

РГАСНТИ 891.51.25

ISSN 0235—3172



# ИТОГИ НАУКИ И ТЕХНИКИ

ПЛАЗМЕННЫЕ ПРОЦЕССЫ  
В КОСМОСЕ

Том 2



Москва 1989

ИТОГИ НАУКИ И ТЕХНИКИ



СЕРИЯ

ПЛАЗМЕННЫЕ ПРОЦЕССЫ  
В КОСМОСЕ

Том 2

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ КОМЕТ  
С СОЛНЕЧНЫМ ВЕТРОМ

Научный редактор: академик Р. З. Сагдеев

Серия издается с 1989 г.



МОСКВА 1989

Главный редактор информационных изданий ВИНТИ  
профессор *П. В. Нестеров*

**ОБЪЕДИНЕННАЯ РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ**

информационных изданий по астрономии, геодезии,  
исследованиям космического пространства и Земли из космоса

Главный редактор: *акад. Р. Э. Сагдеев*

Члены редакционной коллегии: *проф. Т. А. Азекян, акад. В. А. Амбарцумян,*  
*д. ф.-м. н. Ю. В. Батраков, акад. А. А. Боярчук,*  
*чл.-корр. АН СССР Ю. Д. Буланже, к. т. н. В. Д. Власов,*  
*проф. В. Г. Горбачкий, д. ф.-м. н. А. А. Гурштейн, проф. Я. Л. Зилман,*  
*акад. К. Я. Кондратьев, к. ф.-м. н. Э. В. Кононович,*  
*д. ф.-м. н. А. П. Кропоткин, проф. М. Я. Маров,*  
*проф. А. Г. Масевич, д. ф.-м. н. Д. И. Нагирнер,*  
*проф. Ю. М. Нейман, проф. И. Д. Новиков, проф. Л. П. Пеллинен,*  
*проф. В. В. Подобед, к. х. н. Л. Д. Ревина, к. ф.-м. н. Н. Н. Самусь,*  
*проф. В. А. Сарычев, д. ф.-м. н. В. И. Слыш, акад. В. В. Соболев,*  
*д. ф.-м. н. А. В. Тутуков, к. ф.-м. н. В. Г. Шамаев,*  
*д. ф.-м. н. В. В. Шевченко, к. ф.-м. н. Шингарева,*  
*к. ф.-м. н. А. Ю. Щелканова (ученый секретарь редколлегии),*  
*к. ф.-м. н. И. С. Щербина-Самойлова (зам. главного редактора)*

## ПЛАЗМЕННЫЕ НАБЛЮДЕНИЯ В КОМЕТНЫХ ПРОЕКТАХ

М. И. Веригин, К. И. Грингауз

### 1. ВВЕДЕНИЕ

В 1986 г. на протяжении трех недель с 6 по 25 марта шесть космических аппаратов — Vega 1, Suisei, Vega 2, Sakigake, Giotto и ICE последовательно пролетали в окрестности ядра кометы Галлея. В таблице 1 собраны даты и времена их наибольшего приближения к ядру, кометоцентрические расстояния

Таблица 1

Основные характеристики траекторий КА у кометы Галлея в 1986 г.

КА	Дата	Время, UT	$r_{\min}$ , км	$R$ , а. е.	$v_{КА}$ , км/с	$\varphi$	Источник
Vega 1 Suisei	6.03	7.20.06	8030	0,792	79,2	111,2	[31, 212, 94] [120, 121, 122]
	8.03	13.05.49	151 000	0,82	73,0	104,2	
Vega 2 Sakigake Giotto	9.03	7.20.00	8890	0,834	76,8	113,4	[31, 212, 94] [121, 122] [197, 198, 94]
	11.03	4.17.51	$6,99 \cdot 10^6$	0,86	75,3	109,4	
	14.03	0.03.02	596	0,903	68,4	107,1	
ICE ICE*	25.03	10.34	$28,1 \cdot 10^6$	1,07	69,4	111,2	[208, 50, 51] [208, 50, 51]
	11.09	11.02	7800	1,03	20,7	93,0	

\* пролет через хвост кометы Джакобини-Циннера в 1985 г.

КА  $r_{\min}$  и удаление кометы от Солнца  $R$  в соответствующие моменты времени, а также скорость космических аппаратов  $v_{КА}$  относительно кометы Галлея и ее угол  $\varphi$  с направлением на Солнце. Траектории наиболее приближавшихся к ядру КА показаны на рис. 1 в кометоцентрической системе координат (ось  $X$  направлена на Солнце,  $Y$  — параллельна плоскости эклиптики).

Для трех из этих КА — Suisei, Giotto и Sakigake, кометные исследования были основной целью; значительная часть полезной нагрузки Веги 1, 2 предназначалась для попутных исследований поверхности и атмосферы Венеры и, нако-

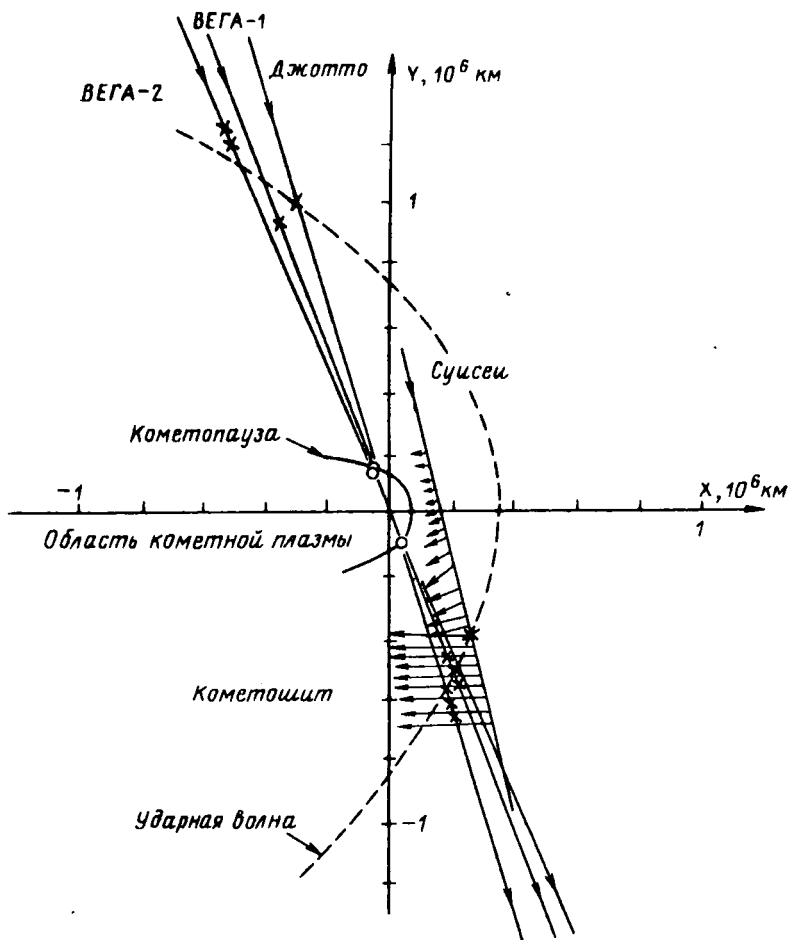


Рис. 1. Траектории КА Vega 1, 2, Giotto и Suissei в окрестности кометы Галлея. Крестики на траекториях — области пересечения ударной волны, кружки — кометопазузы космическими аппаратами

нец, ICE, первоначально называвшийся ISEE-3 и предназначенный для обеспечения исследований солнечно-земных связей, на проведение кометных исследований был перенацелен после ряда гравитационных маневров в системе Земля — Луна.

Удельный вес аппаратуры для проведения прямых плазменных измерений на борту различных КА был также весьма различен. Так, например, плазменные эксперименты на борту Giotto занимали более половины от общей полезной нагрузки этого КА  $\approx 60$  кг, тогда как на Vega 1, 2 удельный (и абсолютный) вес плазменных экспериментов в полезной нагрузке для

кометных исследований  $\approx 200$  кг был существенно меньше. С другой стороны, на борту *Giotto* не проводились измерения плазменных волн, успешно выполненные на *Vega 1, 2*.

В целом, плазменные наблюдения в кометных проектах дали огромный объем ранее недоступной и в значительной степени неожиданной научной информации о физических процессах в околокометном пространстве. В настоящем обзоре после краткого описания использовавшихся для ее получения приборов, будут рассмотрены опубликованные к этому времени результаты наблюдений околокометной плазмы на различных КА и обсуждены возможные причины их частичного различия.

## 2. ПРИБОРЫ ДЛЯ ПЛАЗМЕННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

Информация о распределении и основных характеристиках плазмы в околокометном пространстве была получена в ходе реализации около двадцати независимых экспериментов, перечисленных в таблице 2. Эти эксперименты и входившие в них отдельные датчики были предназначены для измерений как ионной, так и электронной компонент плазмы, ее массового состава, функций распределения заряженных частиц, волновых процессов и замороженного в плазму магнитного поля. Полезную информацию для анализа плазменных процессов дали также эксперименты по измерению распределения нейтрального газа и энергичных частиц. Остановимся конкретно на особенностях методов проведения плазменных измерений на различных КА.

Среди всех КА, пролетавших в окрестности кометы Галлея (Табл. 1), *Vega 1, 2* были единственными, имевшими трехосную ориентацию. Эта особенность КА при относительно небольшом весе плазменной аппаратуры и определила то обстоятельство, что на *Vega 1, 2* измерения ионной компоненты плазмы проводились только в двух основных направлениях — по вектору скорости космического аппарата  $v_{КА}$  относительно кометы, и в направлении на Солнце.

Измерения энергетических спектров и потока ионов в направлении  $v_{КА}$  на *Vega 1, 2* осуществлялись входившими в состав эксперимента ПЛАЗМАГ 1 полусферическим электростатическим анализатором АК и цилиндром Фарадея КЦФ, соответственно (Табл. 2). В направлении на Солнце эти же характеристики плазмы измерялись аналогичными по принципу работы датчиками АС и СЦФ. Для расширения угловой апертуры АК и АС анализаторов перед ними была установлена квадрупольная линза. Энергетические спектры ионов этими анализаторами регистрировались, соответственно, в 120 и 60 энергетических интервалах.

Энергетические спектры электронов в эксперименте ПЛАЗМАГ 1 измерялись при помощи цилиндрического электро-

№	Эксперим.	Датчик	Назначение	Диапазон	Источники	
Beta 1 Beta 2	ПЛАЗМАГ-1 7,8 кг	АС	Энерг. спектр ионов в направ. на Солнце	50—25 000 эВ	[103, 17, 105, 40]	
		АК	Энерг. спектр ионов в направ. V <sub>∞</sub>	15—3500 эВ		
Suisel Sakigake	АПВ Н 4,5 кг АПВ В 2,8 кг МИША 3 кг РПЭ ТЮНДЕ М 4,5 кг ESP 4,7 кг SOW 2,0 кг IMF 5,4 кг RWP 5,2 кг	АЕ	Энерг. спектр электронов	3—10 000 эВ	[205, 206] [29]	
		СЦФ	Поток ионов солнечного ветра	≥ 0,15, 3500 эВ		
		КЦФ	Поток кометных ионов, кон- центрация нейтрального газа	≥ 0,15, 3500 эВ 1—100 асм ≥ 1 см <sup>-3</sup> ≥ 10 <sup>6</sup> см <sup>-3</sup>	[119, 173] [119] [119, 215] [119, 192]	
		УПД	Концентрация нейтрального га- за	0,01—1000 Гц		
		БД-1,2	Флуктуация эл. поля	0,01—1000 Гц	[15, 95, 16]	
		БД-3 ДА	Флуктуации потока плазмы Флуктуации эл. поля	0—30 кГц		
		ЗЛ	Парам. и флуктуации потока электронов Вектор магнитного поля Радиопросвечиваемая кометной плазмы Телескоп энергичных частиц	≥ 10 см <sup>-3</sup> 0—4 Гц ± 100 γ ≥ 10 <sup>6</sup> см <sup>-3</sup> 0,04—13 МэВ	[7, 236, 237]	
			Энерг. спектр ионов и электр. в плоск. эллиптики Угл. зависимость потока ионов в пл. эллиптики Вектор магн. поля	30—16 000 эВ 0—1500 эВ ± 128 γ 0,07—200 мГц	[119, 173] [119] [119, 215] [119, 192]	
			Флуктуации электр. и магнит. поля			

IMS 9 кг	HERS	Энерг., массовые и угл. спектры ионов	1—35 аем 0,01—4,5 кэВ	[42, 182]
NMS 12,7 кг	HIS	Энерг. и массовые спектры ионов	12—57 аем	[156]
JPA 4,7 кг	M	Массовый спектр нейтр. газа и ионов	0,03—1,4 кэВ 1—36 аем	[136]
RPA 3,2 кг	E	Энерг. спектр нейтр. газа и ионов	1—69 аем 0,01—2,18 кэВ	[201]
MAG 1,35 кг	FIS	Энерг. и угл. спектр ионов	0,01—20 кэВ	[178]
EPONA 0,95 кг	IIS	Энерг. спектр отдельн. групп ионов	0,09—90 кэВ 1—45 аем	[161, 163]
SWP PG 5,6 кг	EESA	Энерг. и угл. спектр электронов	0,01—30 кэВ	[50, 51]
PW	RICCA	Энерг. спектр кометных ионов	0,25—5 кэВ 10—200 аем 4.10 <sup>-3</sup> —6.10 <sup>4</sup> γ	
HVM LECR RW EPAS	T-1,2,3	Вектор магнитного поля Телескоп энергичных частиц Энерг. и угл. спектр электронов Ионный состав Флуоресценция электр. и магнитного поля Вектор магнит. поля Энерг. и угл. спектр ионов Радиозолны Телескоп энергичных частиц	0,02—50 МэВ 0,005—1,5 кэВ 14—34 аем 0,02—100 мГд ±146 γ 0,002—80 МэВ 0,02—3 мГд 0,03—1,6 МэВ	

Глофо

ICE



статического анализатора АЕ, ориентированного перпендикулярно плоскости эклиптики. Оценка концентрации кометного нейтрального газа в окрестности КА проводилась по измерениям тока вторичных электронов и ионов с коллектора КЦФ и вторичных электронов с плазменного ударного детектора УПД (Табл. 2).

Интенсивность плазменных волн на КА Vega 1, 2 измерялась в двух экспериментах — АПВ-Н и АПВ-В. В первом эксперименте измерялась амплитуда колебаний одной из компонент электрического поля с помощью вынесенных на штангах зондов БД-1, 2, поток и флуктуации потока плазмы с помощью четырехколлекторного цилиндра Фарадея БД-3 (Табл. 2). В эксперименте АПВ-В для измерения флуктуаций электрического поля использовалась дипольная антенна ДА размахом 11 м; измерения параметров электронной компоненты плазмы проводились с помощью двух цилиндрических зондов Ленгмюра ЗЛ.

Для измерения магнитного поля на борту КА Vega 1, 2 были установлены по два феррозондовых магнитометра МИША (Табл. 2). Трехкомпонентный датчик размещался на конце штанги длиной 1,7 м, закрепленной на краю солнечной панели. Однокомпонентный — на этой же штанге на 1 м ближе к КА.

В эксперименте по двухчастотному радиопросвечиванию кометной плазмы РПЭ (Табл. 2) использовались радиопередающие устройства КА Vega 1, 2, излучающие когерентные сигналы дециметрового ( $\lambda_1=32$  см) и сантиметрового ( $\lambda_2=5$  см) диапазонов.

Полупроводниковый телескоп энергичных частиц ТЮНДЕ-М (Табл. 2) проводил измерения спектров ионных потоков в диапазоне энергий 40—630 кэВ в плоскости эклиптики перпендикулярно оси Солнце — комета.

Энергетические спектры ионов и электронов на КА Suisei измерялись с помощью отдельных электростатических анализаторов ESP (Табл. 2) с углом отклонения заряженных частиц  $\approx 270^\circ$ . Измерения одновременно проводились в трех направлениях в пределах  $\pm 30^\circ$  от плоскости эклиптики; для сканирования по азимутальному углу использовалось вращение КА.

На КА Sakigake, вращавшемся как и Suisei относительно оси перпендикулярной плоскости эклиптики, для измерения азимутального распределения ионной компоненты плазмы в плоскости эклиптики использовался модуляционный цилиндр Фарадея SOW (Табл. 2). Измерения магнитного поля на этом КА проводились трехкомпонентным феррозондовым магнитометром IMF, смонтированным на двухметровой штанге, а в эксперименте по исследованию плазменных волн РWP использовалась 10 м дипольная антенна и индукционный магнитометр (Табл. 2).

Особенностью Giotto, существенной для проектирования плазменных экспериментов на этом КА и интерпретации их ре-

зультатов, являлась его закрутка относительно  $\vec{v}_{КА}$ . Масс-спектрометр ионов IMS (Табл. 2) на Giotto состоял из двух независимых датчиков — нацеленных на измерение более энергичных (HERS) и более интенсивных (HIS) ионных потоков. В обоих датчиках для массового анализа ионов использовались магнитные отклоняющие системы. Поле зрения спектрометра HIS было близко к направлению  $\vec{v}_{КА}$ , тогда как спектрометр HERS регистрировал потоки ионов, приходящих под углом  $15^\circ$ — $75^\circ$  по отношению к этому вектору.

Масс-спектрометр нейтрального газа NMS (табл. 2) кроме измерения массового состава кометного газа позволял также проводить аналогичные измерения ионной компоненты плазмы в направлении близком к  $\vec{v}_{КА}$ . В M-анализаторе этого спектрометра использовалась магнитная отклоняющая система, а в E-анализаторе — анализ проводился только с помощью электрического поля, и для этого датчика существенно равенство скоростей регистрируемых им частиц.

Из двух независимых датчиков состоял также и плазменный прибор JPA (Табл. 2). Электростатический анализатор FIS этого прибора с углом отклонения  $270^\circ$  на вращающемся КА позволял проводить измерения энергетических спектров ионов практически в любом направлении. В датчике IIS была реализована также возможность оценки массы регистрируемых ионов путем измерения времени их пролета базисного расстояния 2,2 см.

Измерения электронной компоненты плазмы на КА Giotto проводились датчиком EESA эксперимента RPA (Табл. 2). Выбранная его авторами необычная конструкция полусферического анализатора с дефлектором и вводом частиц в анализатор в вершине полусферы позволила проводить измерения двух трехмерных функций распределения электронов за один оборот КА (4 с). Другой датчик этого эксперимента — PICCA предназначался для измерения энергетических спектров кометных ионов и был ориентирован приблизительно по направлению  $\vec{v}_{КА}$ . Для улучшения энергетического разрешения ионы предварительно тормозились электрическим полем перед входом в полусферический анализатор.

Магнитное поле на борту «Giotto», как и на Вега 1, 2, измерялось двумя феррозондовыми магнитометрами MAG (Табл. 2). Трехкомпонентный датчик был установлен на возвышающейся над параболической антенной треноге. Двухкомпонентный — на этой же конструкции, но ближе к корпусу КА.

Мониторинг потоков энергичных частиц на Giotto осуществлялся тремя полупроводниковыми телескопами эксперимента EPONA (Табл. 2). Один из них ( $T_1$ ) был ориентирован под углом  $135^\circ$  к  $\vec{v}_{КА}$ , а два ( $T_{2,3}$ ) — под углом  $45^\circ$ , причем теле-

скоп  $T_2$  был дополнительно покрыт фольгой толщиной  $500 \text{ мкг/см}^2$ , не позволявшей протонам с энергией  $\leq 350 \text{ кэВ}$  проникать в полупроводниковый детектор.

Из 13 экспериментов, размещенных на ICE, полезная информация о свойствах околокометной плазмы могла быть получена в перечисленных в табл. 2 семи экспериментах из которых SWP и LECR частично вышли из строя. Трехмерные энергетические спектры электронов измерялись с помощью четвертьсферического электростатического анализатора эксперимента SWP. Эксперимент по измерению ионного состава плазмы PC, перепрограммированный перед встречей с кометами, был реализован на основе фильтра Вина. Флуктуации электрического поля в широком диапазоне частот исследовались в экспериментах RW и PW. В последнем эксперименте также измерялись флуктуации магнитного поля с помощью индукционного магнитометра. Постоянная составляющая магнитного поля на борту ICE измерялась трехкомпонентным гелиевым магнитометром HVM. Энергичные частицы в диапазоне энергий  $2 \text{ кэВ}—80 \text{ МэВ}$  исследовались в экспериментах LECR и EPAS при помощи электростатической анализирующей системы, пропорционального счетчика и полупроводниковых телескопов.

### 3. ПЛАЗМА ВО ВНЕШНЕЙ КОМЕ

При приближении космических аппаратов к комете ее присутствие по данным измерений заряженных частиц прежде всего проявляется в появлении энергичных ионов кометного происхождения. На рис. 2 а приведена зависимость от кометоцентрического расстояния  $r$  скорости счета энергичных ионов  $f$  в одном из энергетических каналов телескопа ТЮНДЕ-М на КА Вега 1 [35, 238]. Диапазон энергий ионов, регистрируемых в этом канале, составлял  $64—74 \text{ кэВ}$  в случае, если эти ионы — протоны, или  $126—139 \text{ кэВ}$ , если это тяжелые ионы  $O^+$  [21, 142]. Эта же зависимость по данным телескопа EPONA, измеренная при приближении КА Giotto к комете Галлея показана на рис. 2 б [58, 162]. Для удобства сравнения на этом рисунке показан канал 2 с энергиями  $44—78 \text{ кэВ}$  для протонов или  $97—144 \text{ кэВ}$  для ионов группы воды, соответственно [163].

Характерной особенностью приведенных на рис. 2 данных является систематический рост потоков с уменьшением  $r$ . Этот рост становится особенно крутым на кометоцентрических расстояниях  $r < (2—3) \cdot 10^6 \text{ км}$ , и особенно большие потоки наблюдались в окрестности фронта околокометной ударной волны.

Присутствие энергичных кометных ионов по данным ТЮНДЕ-М можно было наблюдать начиная с  $\approx 10^7 \text{ км}$  от ядра (рис. 2 а) и по данным Giotto, где телескоп EPONA имел в три раза меньший геометрический фактор — начиная с  $r \approx 7 \cdot 10^6 \text{ км}$  (рис. 2 б). Рост потоков энергичных частиц, свя-

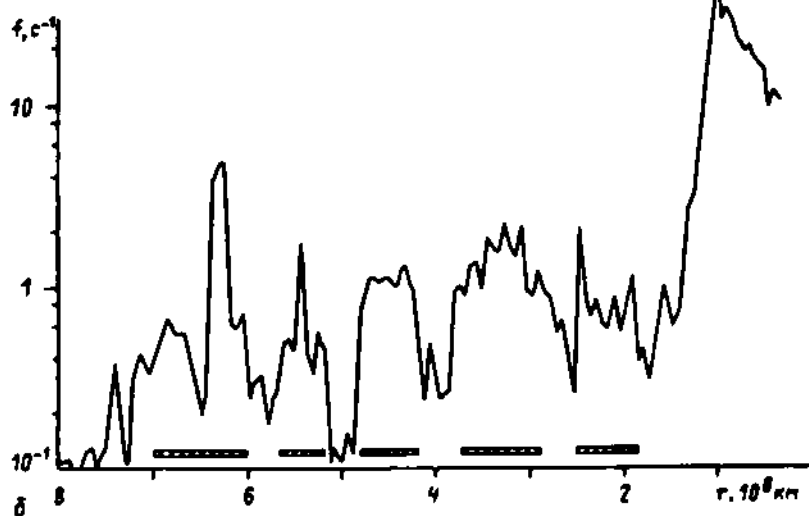
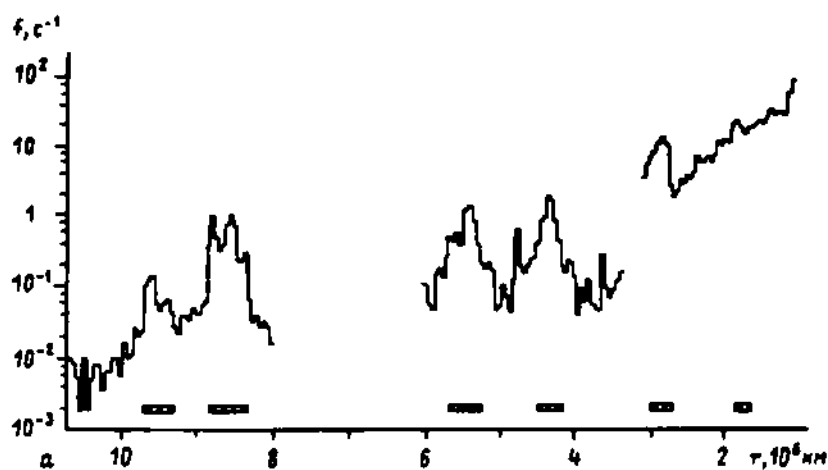


Рис. 2. Кометоцентрический профиль потоков энергичных ионов  $\approx 10^2$  эВ по данным телескопов заряженных частиц ТЮНДЕ-М на КА Vega 1 (а) и EPONA на КА Giotto (б)

занный с приближением КА ICE к комете Джакобини — Циннера, начал регистрироваться только начиная с  $\approx 1,8 \cdot 10^6$  км от ядра [126], поскольку скорость производства нейтрального газа этой кометой при встрече с ней КА ICE была в 20—40 раз меньше, чем скорость производства нейтрального газа кометой Галлея при встрече с ней КА Vega 1 и Giotto [ср., напр., 27, 51, 156].

Общий рост потоков энергичных ионов с уменьшением  $r$  очевидно связан с ростом концентрации нейтрального газа при приближении к комете. Эта связь, однако, далеко не тривиальна. Действительно, кометные ионы, только что образовавшиеся из нейтрального газа посредством фотоионизации, ударной ионизации электронами, и перезарядки с протонами солнечного ветра, практически покоятся в системе координат, связанной с кометой. Эти ионы сначала ускоряются самосогласованным электрическим полем  $\vec{E} = -1/c[\vec{v}, \vec{B}]$ , где  $\vec{v}$  скорость и  $\vec{B}$  магнитное поле в солнечном ветре, и начинают дрейфовать по циклоидальным траекториям в направлении  $[\vec{E}, \vec{B}]$ . Поэтому функция распределения кометных ионов первоначально образует кольцо в пространстве скоростей, движущееся со скоростью  $(\vec{v}, \vec{B})/B$  параллельно магнитному полю. До проведения кометных экспериментов предполагалось, что магнитный момент  $\mu = m_i v^2 / 2B$  захваченных таким образом ионов является адиабатическим инвариантом [253].

Неожиданная особенность такого процесса — развитие сильной МГД-турбулентности, стала очевидной только после прямых измерений магнитного поля в окрестности кометы Джакобини-Циннера [243]. Причиной ее возбуждения является ионно-циклотронная неустойчивость образовавшегося на первоначальном этапе пучка кометных ионов в плазме солнечного ветра [211, 258]. При эффективном рассеянии кометных ионов на генерируемых пучком альвеновских волнах в качестве адиабатического инварианта следует уже рассматривать не магнитный момент иона, а  $v_{\parallel}^2 + (v_{\perp} \pm v_A)^2$ , где  $v_{\parallel, \perp}$  — скорость образовавшегося кометного иона и  $v_A$  — альвеновская скорость. В соответствии с теорией этого процесса, развитой в [211] в приближении слабой турбулентности, характерная частота возбуждаемых волн порядка гирочастоты тяжелых ионов  $\omega_{ci} = eB/m_i c \approx 10^{-2}$  Гц (для ионов  $O^+$ ), что находится в согласии с наблюдениями в окрестностях комет Галлея и Джакобини-Циннера [28, 243].

Поскольку  $v_A \ll v$ , то при рассеянии на альвеновских волнах в первом приближении сохраняется энергия  $\sim v_{\parallel}^2 + v_{\perp}^2$ , т. е. происходит в основном рассеяние вновь образовавшихся ионов по питч-углам. На протяжении нескольких гироспериодов такой процесс приводит к почти полной изотропизации вновь образовавшихся ионов в системе координат, связанной с солнечным ветром (СВСК) [82, 211].

Однако, при скорости солнечного ветра 500 км/с энергия изотропизированных кометных ионов в СВСК составляет  $\approx 1$  кэВ для протонов и  $\approx 20$  кэВ для тяжелых ионов группы воды. Такие ионы не могли быть зарегистрированы телескопами энергичных частиц. Анализ условий регистрации энергичных кометных ионов на КА Вега 1, выполненный в [21, 142], показал, что для того, чтобы быть зарегистрированными этим прибором ионы группы воды должны увеличить свою энергию в СВСК в  $\approx 5$  раз, а протоны — в  $\approx 100$  раз. Этот набор энергии происходит в результате стохастического ускорения кометных ионов при их рассеяниях на флуктуациях магнитного поля (ускорение Ферми второго рода) [101, 130]. Однако, коэффициент диффузии ионов по энергии в  $\approx (v_{\perp}/v)^2$  меньше коэффициентаpitch-угловой диффузии ионов.

Общий рост потоков энергичных ионов, регистрируемых ТЮНДЕ-М и EPONA, сопровождался относительно кратковременными, квазипериодическими увеличениями их интенсивности, отмеченными в нижней части рис. 2. Характерный период этого процесса  $\approx 4$  часа. Попытка связать наблюдавшиеся увеличения потоков энергичных ионов с изменениями направления межпланетного магнитного поля привела к отрицательным результатам, и единственное предложенное до настоящего времени их объяснение основывается на предположении, что периодичность возрастаний ионных потоков связана с периодичностью производства нейтрального газа кометным ядром [21].

Действительно, телевизионные наблюдения, проведенные на Вега 1, 2 и Giotto показали, что скорость производства пыли (и, возможно, связанная с этим процессом скорость производства нейтрального газа) чрезвычайно неоднородна по поверхности ядра [145, 213]. Предположив, что на поверхности ядра существует относительно активная область, которая производит повышенное количество нейтрального газа только когда она обращена к Солнцу, мы получим, что приток нейтрального газа в столкновительную область (не превышающую нескольких тысяч километров) будет модулирован с периодом вращения кометного ядра  $T \approx 54$  часа. Вне этой области нейтральный газ, расширяясь со скоростью  $v_n$  образует сферические оболочки с пространственным периодом  $L = v_n T$  (в пренебрежении давлением солнечного излучения и кепплеровскими силами). На Вега 1 и Giotto, движущихся сквозь них с  $v_{КА}$  (см. Табл. 1), повышенная концентрация нейтрального газа должна наблюдаться с периодом  $T_{КА} = L / (v_n + v_{КА}) \ll T$  при подлете к комете. Приблизительно с этим же периодом будут модулированы и потоки энергичных ионов независимо от того, образовались ли и ускорились такие ионы в окрестности КА, или они являются интегральным результатом действия этих процессов вдоль соответствующей линии тока солнечного ветра.

В работе [204] на основе совместного анализа квазипериодических возрастаний потоков энергичных ионов на КА Vega 1 и Giotto построена система расширяющихся со скоростью  $v_n \approx 6,2$  км/с оболочек нейтрального газа удовлетворительно описывающая периодичность наблюдавшуюся в данных обоих КА (рис. 2). Однако при ее построении использовалось предположение, что в пропущенном на рис. 2а интервале кометоцентрических расстояний  $6 \cdot 10^6 \leq r \leq 8 \cdot 10^6$  км должно наблюдаться два максимума ионных потоков. В части пропущенного интервала кометоцентрических расстояний прибор ТЮНДЕ-М работал в другом режиме работы (с большим уровнем фона) и примерно в середине его был зарегистрирован еще один узкий максимум ионных потоков [21, 142]. Повторив с использованием этого обстоятельства проделанный в [204] анализ, можно показать, что наилучшим образом экспериментальные данные обоих КА описываются при  $v_n \approx 7,3$  км/с.

Эта скорость расширения нейтрального газа на расстояниях свыше нескольких миллионов километров от ядра близка к скорости атомов водорода  $\approx 8$  км/с, образующихся при фотодиссоциации молекулы OH [164]. Сходные значения скорости ( $\approx 7$  км/с) были получены, например, в работе [144] для медленной компоненты водорода при анализе  $La$  изофот кометы Беннета (1970 II).

Как отмечалось выше, для того, чтобы быть зарегистрированными телескопом ТЮНДЕ-М, протоны, образовавшиеся из кометных атомов водорода должны увеличить свою энергию в  $\approx 100$  раз, тогда как тяжелые ионы группы воды всего в  $\approx 5$  раз. Это возможно, так как стохастическое ускорение Ферми в приближении сильной турбулентности в  $\approx 15$  раз более эффективно для протонов, чем для тяжелых ионов [130]. Наблюдавшаяся значительная амплитуда вариаций интенсивности потоков энергичных ионов (в  $\approx 10$ —20 раз, рис. 2) также легче может быть объяснена в случае, если эти ионы являются протонами. Действительно из теоретических соображений трудно ожидать на больших расстояниях от ядра вариаций концентрации нейтрального газа (и потоков только что образовавшихся ионов) свыше нескольких десятков процентов. Однако, даже небольшие изменения эффективности механизма ускорения Ферми (и связанное с ним небольшое изменение крутизны энергетического спектра ускоренных ионов) приведет к значительным вариациям потоков протонов с энергиями с энергиями в  $\approx 100$  раз больше первоначальной и к существенно меньшим вариациям потоков тяжелых ионов с энергиями только в  $\approx 5$  раз больше начальной.

В рассмотренной выше модели, связывающей квазипериодические увеличения интенсивности потоков энергичных ионов на  $r \approx (2-10) \cdot 10^6$  км с вращением ядра кометы Галлея, суще-

ственна только достаточно быстрая компонента кометного нейтрального газа. Ближе к ядру особенности околокометной плазмы в значительной степени определяются присутствием медленно движущихся, тяжелых кометных нейтралов. Поэтому перед дальнейшим анализом результатов плазменных наблюдений в кометных проектах целесообразно обсудить основные характеристики их распределения. И теоретический анализ (см. напр. [164]), и прямые экспериментальные данные [156] свидетельствуют, что скорость тяжелых молекул нейтрального газа  $v_n \approx 1$  км/с. Эти молекулы не могут улететь далеко от ядра, поскольку характерные пространственные масштабы, на которых становится существенными ионизация и давление солнечного излучения, быстро уменьшаются с падением  $v_n$  (они пропорциональны  $v_n$  и  $v_n^2$ , соответственно). Ускоренные продукты ионизации медленных тяжелых кометных нейтральных молекул, по видимому, и ответственны за быстрый рост потоков энергичных ионов, наблюдавшихся на Веге 1 при  $r \lesssim 3 \cdot 10^6$  км (рис. 2 а).

На рис. 3 приведена кометоцентрическая зависимость концентрации нейтрального газа в окрестности кометы Галлея.

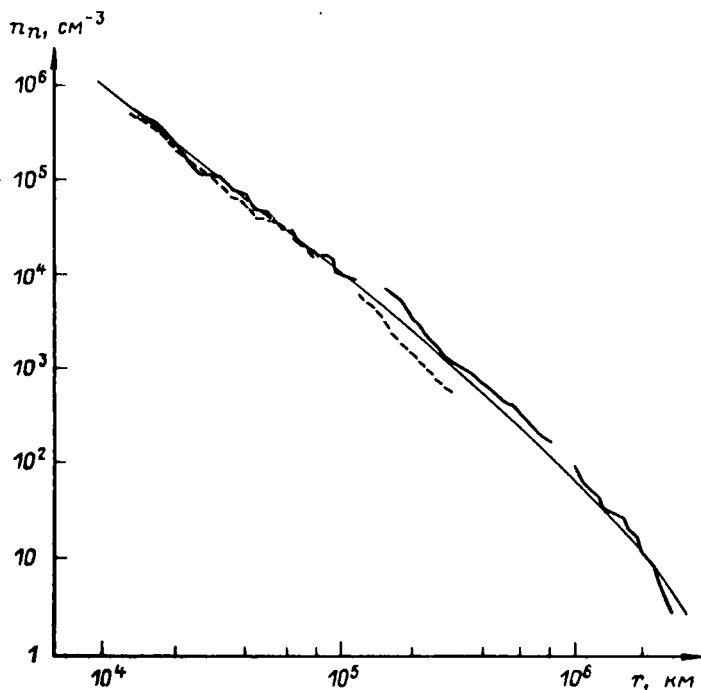


Рис. 3. Кометоцентрический профиль концентрации нейтрального газа  $n_n$  по показаниям датчика КЦФ эксперимента ПЛАЗМАГ-1 при подлете Веги 1 к ядру кометы (сплошная линия) и отлете от него (пунктир). Плавная кривая — аппроксимирующая зависимость



рассчитанная по данным датчика КЦФ эксперимента ПЛАЗМАГ-1 на Вега 1 [27, 203]. Толстой сплошной и штриховой линиями на этом рисунке показаны результаты оценок  $n_n$  при подлете Веги 1 к ядру и отлете от него, соответственно. Тонкой сплошной линией на рис. 3 показана зависимость

$$n_n(r) = n_0(r_0/r)^2 \exp(-r/\lambda), \quad (1)$$

рассчитанная при  $n_0 = 10^4 \text{ см}^{-3}$ ,  $r_0 = 10^5 \text{ км}$  и  $\lambda = 2 \cdot 10^6 \text{ км}$  [18, 104, 106]. Как можно видеть из представленных на рис. 3 данных, результаты оценки  $n_n$  по данным КЦФ на КА Вега 1 достаточно хорошо описываются простейшей зависимостью (1), полученной в [114] в предположении радиального истечения нейтральных молекул с ограниченным временем жизни  $\tau_i = \lambda/v_n$ . Это обстоятельство позволило оценить скорость производства газа кометой Галлея как  $Q_0 = 4\pi v_n n_0 r_0^2 = 1,3 \cdot 10^{30} \text{ с}^{-1}$  при  $v_n = 1 \text{ км/с}$  [18, 106].

Следует отметить также и наблюдавшиеся систематические отклонения  $n_n$  от простейшей зависимости (1). Так, например, при подлете Веги 2 к комете в диапазоне кометоцентрических расстояний  $1,5 \cdot 10^4 \leq r \leq 10^5 \text{ км}$  значения  $n_n$  были в 2 раза меньше, чем на КА Вега 1, тогда как дальше от ядра  $n_n$  на обоих КА были существенно ближе друг к другу. Для обоих КА значения  $n_n$  на отлетной части траектории при  $1,5 \cdot 10^5 \leq r \leq 3 \cdot 10^5 \text{ км}$  были меньше, чем на подлете к ядру [27, 203].

Первое из этих отклонений, по видимому, связано с обсуждавшимся выше нестационарным во времени характером испускания нейтрального газа вращающимся ядром кометы Галлея. Причины второго отклонения проанализированы в [112], где показано, что оно вызвано отклонением распределения нейтрального газа от сферически симметричного в результате давления солнечного излучения.

Кроме приведенных выше данных, скорость производства нейтрального газа ядром кометы Галлея оценивалась по данным многих как прямых так и дистанционных экспериментов. Например, по данным масспектрометра NMS на борту Giotto скорость производства молекул воды  $\approx 6,9 \cdot 10^{29} \text{ с}^{-1}$  [156]. По результатам измерений в видимом и инфракрасном диапазонах при помощи трехканального спектрометра ТКС на борту Вега 2 скорости производства молекул  $\text{H}_2\text{O}$  и  $\text{OH}$  были оценены, соответственно, как  $\approx 4 \cdot 10^{29} \text{ с}^{-1}$  и  $\approx 1,7 \cdot 10^{30} \text{ с}^{-1}$  [158]. По данным измерений этим же прибором в ближнем ультрафиолетовом и видимом диапазонах  $Q_{\text{OH}} \approx 9 \cdot 10^{29} \text{ с}^{-1}$  [170]. По спектральным измерениям в УФ-диапазоне со спутника IUE скорость производства  $\text{H}_2\text{O}$  в момент встречи Веги 2 и Giotto с кометой Галлея была оценена как  $\approx 5,6 \cdot 10^{29} \text{ с}^{-1}$  и  $\approx 5,2 \cdot 10^{29} \text{ с}^{-1}$ , соответственно. Скорость производства газа кометой Джакобини-Циннера на момент встречи с ней ICE была су-

щественно меньше, чем у кометы Галлея и составляла (2—5) · 10<sup>28</sup> с<sup>-1</sup> [208, 51].

Одно из следствий присутствия нейтрального газа во внешней коме — появление в этой области ускоренных до энергий  $\approx 10^2$  кэВ продуктов его ионизации, обсуждалось выше. Рассмотрим более детально экспериментальные данные, относящиеся к процессу вовлечения в поток солнечной плазмы кометных ионов только что образовавшихся в нем при ионизации нейтрального газа, и к следствиям нагружения солнечного ветра кометными ионами.

Первые признаки присутствия захваченных кометных протонов в потоке солнечной плазмы на КА Giotto стали обнаруживаться на  $\approx 8 \cdot 10^6$  км [46]. На рис. 4 [183, 184] приведены результаты измерения функции распределения протонов  $f(v)$  по данным датчика HERS масс-спектрометра IMS на КА Giotto на расстояниях  $\approx 4 \cdot 10^6$  км (а) и  $\approx 2 \cdot 10^6$  км (б) от ядра. Показанные на этом рисунке изолинии построены по данным полученным вдоль конической поверхности с осью параллельной  $v_{КА}$  и углом раствора 60—70°, содержащей направление на Солнце (ось X).

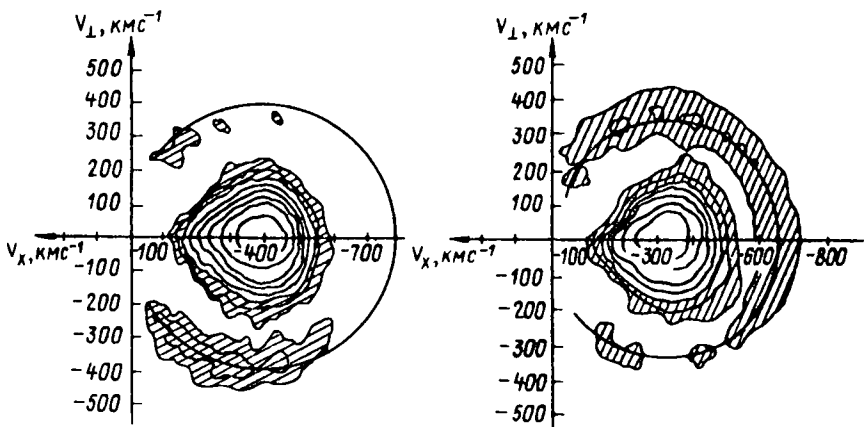


Рис. 4. Функция распределения протонов на расстояниях  $r \approx 4 \cdot 10^6$  км (а) и  $r \approx 2 \cdot 10^6$  км (б) от ядра кометы Галлея по данным масс-спектрометра HERS эксперимента IMS на КА Giotto

Звездочкой на рис. 4 отмечен максимум функции распределения протонов солнечного ветра. При удалении от максимума значения  $f(v)$  уменьшаются между двумя соседними линиями в  $\approx 4,6$  раза. После падения на  $\approx 5$  порядков величины и достижения минимума  $f(v)$  снова несколько возрастает во внешней кольцеобразной области охватывающей (частично) основную часть  $f(v)$ . В этой области регистрируются протоны кометного происхождения. Плавной кривой на рис. 4 показано

пересечение сферической оболочки в пространстве скоростей, по которой происходит питч-угловое рассеяние протонов, с описанной выше конической поверхностью. Штриховкой на рисунке выделены области протонов солнечного ветра и кометного происхождения с одинаковой интенсивностью потоков.

Как видно из приведенных на рис. 4 данных, протоны кометного происхождения действительно преобладающим образом подтверждены питч-угловому рассеянию по сферической оболочке в пространстве скоростей в соответствии с изложенными выше представлениями о механизме этого процесса [82, 211]. Диффузия по энергиям, приводящая к расширению этих оболочек, не выражена столь сильно и на расстоянии  $\approx 4 \cdot 10^6$  км от кометы ширина сферической оболочки сопоставима с энергетическим разрешением HERS [184]. С приближением к ядру степень заполнения кометными ионами сферической оболочки увеличивается (ср. рис. 4 а и рис. 4 б) таким образом, что на кометоцентрических расстояниях  $r \leq 1,2 \cdot 10^6$  км распределение захваченных протонов вдоль этой оболочки близко к однородному (см. рис. 4 в [179]).

Аналогичная картина вовлечения в поток солнечного ветра наблюдается и для более тяжелых ионов группы воды. По данным времяпролетного масс-спектрометра IIS эксперимента JRA на КА Giotto было также показано присутствие в значительной мере заполненных оболочек тяжелых кометных ионов в пространстве скоростей [256]. Эти оболочки наблюдались по крайней мере с  $r \leq 2 \cdot 10^6$  км [257], до ударной волны их радиус соответствовал локальной скорости солнечного ветра [256]. Как по данным HERS, так и по данным IIS были оценены также кометоцентрические зависимости плотности тяжелых ионов. Средняя фазовая плотность части сферической оболочки кометных протонов, наблюдаемой датчиком HERS, спадает с увеличением  $r$  от ударной волны до  $\approx 8 \cdot 10^6$  км как  $\langle f \rangle \sim r^{-7/4}$  [184]. Плотность захваченных ионов группы воды от ударной волны до  $r \approx 2 \cdot 10^6$  км уменьшается несколько круче чем  $r^{-2}$  [257], что качественно соответствует наблюдавшемуся профилю  $n_n(r)$  [27, 203]. Частично заполненные (на  $\approx 50\%$  по оценке авторов) оболочки захваченных кометных протонов и ионов группы воды по данным энергоспектрометра ESP на КА Suissei наблюдалась с  $\approx 9,7 \cdot 10^6$  км и  $\approx 4 \cdot 10^6$  км, соответственно [241].

Рассмотрим теперь крупномасштабные следствия нагружения солнечного ветра кометными ионами. Для трехмерного течения уравнения (2,3) из [78, 79] могут быть записаны в следующем виде:

$$\begin{aligned} \operatorname{div}(\rho \vec{V}) &= Q(r) \\ \rho(\vec{V}, \nabla) \vec{V} &= -\nabla P - Q(r) \vec{V}, \end{aligned} \quad (2)$$

где  $\rho$  — плотность потока плазмы,  $Q(r) = m_i n_i / \tau_i$  — скорость его нагружения кометными ионами массой  $m_i \approx 17 m_p$ ,  $P = 4\pi m_i / 3 \int_0^\infty v^4 f_{oi}(v) dv$  — их давление и  $f_{oi}$  — изотропная часть функции распределения кометных ионов. В пренебрежении анизотропией pitch-углового распределения кометных ионов, необходимой для поддержания плазменной неустойчивости и непрерывной генерации альвеновских волн, уравнение для изменения  $f_{oi}(v)$  вдоль подсолнечной трубки тока плазмы площадью  $A(x)$  может быть записано в следующем виде [79]:

$$\frac{1}{A} \frac{\partial}{\partial x} (VA f_{oi}) = -\frac{Q(r)}{4\pi m_i v^2} \delta(v-V) + \frac{1}{A} \frac{\partial (VA)}{\partial x} \frac{1}{3v^2} \frac{\partial}{\partial v} (v^3 f_{oi}), \quad (3)$$

где последний член описывает адиабатическое охлаждение кометных ионов. Для трехмерного течения из (3) следует:

$$\text{div} (P\vec{V}) = QV^2/3 - 2/3P \text{div} \vec{V} \quad (4)$$

Используя систему уравнений (2, 4) можно оценить ожидаемые изменения гидродинамических характеристик потока вдоль траектории космических аппаратов на больших расстояниях

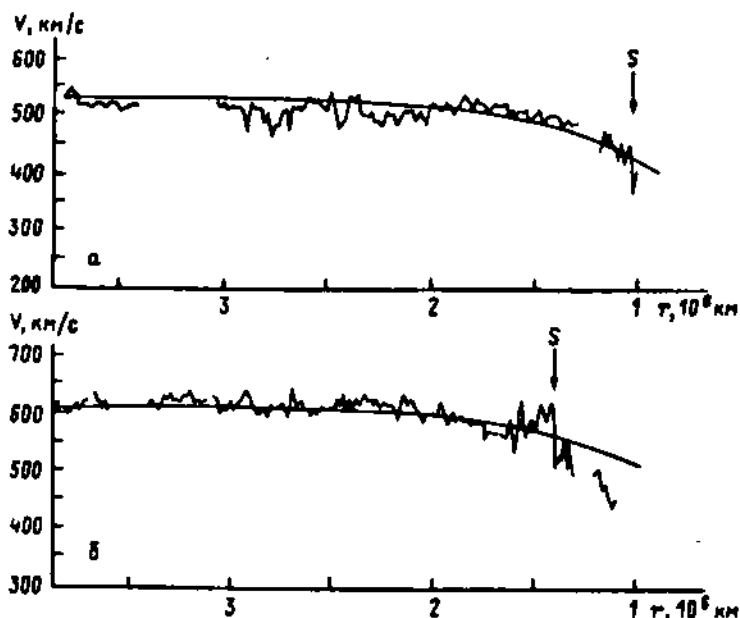


Рис. 5. Кометоцентрическая зависимость скорости солнечного ветра  $V$  по данным АС анализатора эксперимента ПЛАЗМАГ-1 на КА Вега 1 (а) и Вега 2 (б). Плавная кривая — расчетная зависимость.  $S$  — положение фронта околокометной ударной волны

от кометы, где его первоначальные скорость  $U_0$  и плотность  $\rho_0$  еще слабо возмущены нагруженными ионами:

$$\begin{aligned}
 U &= U_0 - \frac{4}{3\rho_0} L_0(r, \varphi), & \vartheta &= \frac{\cos \varphi \sin \varphi}{3\rho_0} L_2(r, \varphi), \\
 \rho &= \rho_0 + \frac{1}{u_0} \left( 2L_0 + \frac{3 \cos^2 \varphi - 1}{6} L_2 + \frac{\cos^2 \varphi \sin^2 \varphi}{2} L_4 \right), & (5) \\
 P &= \frac{u_0}{3} L_0(r, \varphi),
 \end{aligned}$$

где  $L_n(r, \varphi) = r \int_{\cos \varphi}^{\infty} Q(r\sqrt{\xi^2 + \sin^2 \varphi}) / \xi^n d\xi$ ,  $U$  и  $\vartheta$  — параллельная

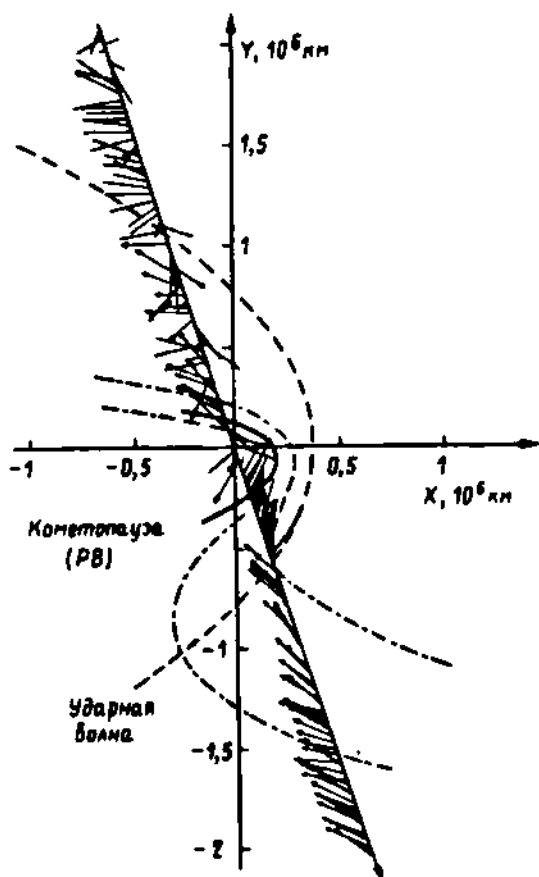


Рис. 6. Результаты измерения магнитного поля вдоль траектории КА Giotto 13—14 марта 1976 г. Штрихпунктирные линии качественно показывают обволакивание кометы силовыми линиями межпланетного магнитного поля

и перпендикулярная оси  $X$  компоненты скорости потока плазмы, а значения  $\varphi$  для различных КА приведены в Таблице 1.

На рис. 5 показана зависимость от кометоцентрического расстояния переносной скорости протонов солнечного ветра  $V$ , полученная по данным АС анализатора эксперимента ПЛАЗМАГ-1 на КА Вега 1 (а) и Вега 2 (б) [10, 249, 251]. Как можно видеть из приведенных на этом рисунке данных, падение скорости солнечного ветра вследствие нагрузки его тяжелыми кометными ионами началось за  $(2-3) \cdot 10^5$  км от ядра.

Плавными сплошными кривыми на рис. 5 показана зависимость  $V(r) \approx U(r)$ , рассчитанная согласно (5) вдоль траектории КА при  $U_0 = 540$  км/с (а) и  $U_0 = 620$  км/с (б). При расчетах кометоцентрическая зависимость  $n_n(r)$  бралась в соответствии с выражением (1), согласующимся с данными КЦФ [27, 203], в качестве значений  $\rho_0$  использовались результаты оценки этого параметра по данным АС анализатора на КА Вега 1  $\rho_0/m_p = 12$  см $^{-3}$  и Вега 2  $\rho_0/m_p = 11$  см $^{-3}$  [18]. Очевидно разумное согласие измеренных и рассчитанных  $V(r)$  зависимостей.

Торможение солнечной плазмы при ее нагружении кометными ионами приводит к задержке на некоторое время в околокометном пространстве «вмороженного» в плазму магнитного поля и к характерной картине обвалакивания кометы его силовыми линиями. На рис. 6 [195, 196] в проекции на плоскость эклиптики приведены результаты измерения магнитного поля магнитометром МАГ на КА «Giotto». Штрих-пунктирной линией схематически показаны две силовые линии, обвалакивающие комету Галлея.

#### 4. ОКОЛОКОМЕТНАЯ УДАРНАЯ ВОЛНА И КОМЕТОШИТ

Торможение потока плазмы при приближении к кометному ядру не является непрерывным и в нагруженном кометными ионами солнечном ветре образуется ударная волна. Ее положение в околокометном пространстве, наблюдавшееся по данным измерений на различных КА показано крестиками на рис. 1. По приведенным на этом рисунке данным кометоцентрическое расстояние до подсолнечной точки ударной волны в окрестности кометы Галлея может быть оценена как  $\approx 3,5 \cdot 10^5$  км. Аналогичное расстояние для кометы Джакобини-Циннера значительно меньше и составляет  $\approx 4 \cdot 10^4$  км [70]. Аппроксимирующее выражение для поверхности фронта ударной волны у кометы Галлея можно найти, например, в [179, 180], однако оно получено без учета aberrации угла прихода солнечного ветра из-за собственного движения кометы и нуждается в уточнении.

До прямых плазменных измерений в окрестности кометы Галлея не было определено существование околокометных ударных волн. Их образование и месторасположение хотя и предсказывалось МГД моделями взаимодействия сол-

нечного ветра с кометами [см., напр., 224], однако обсуждалась и возможность постепенного торможения потока солнечной плазмы [252]. Авторы книги [164], вошедшей непосредственно перед проведением обсуждающихся в настоящем обзоре измерений, резюмировали сложившуюся ситуацию следующим образом — «для точной информации о существовании или отсутствии внешней и внутренней ударной волны... придется подождать пока европейский, советские и японские КА встретятся с кометой Галлея» (стр. 112). Результаты измерения магнитного поля при пролете ICE вблизи кометы Джакобини-Циннера показали присутствие достаточно резкого перехода от более спокойного межпланетного магнитного поля к турбулизованному при приближении к ядру кометы и обратного перехода — при удалении от него [235]. Однако авторы измерений, по-видимому под впечатлением имевшихся ранее сомнений в существовании ударных волн, и в связи с тем, что из-за малой скорости производства нейтрального газа этой кометой (см. выше) фронт волны находился близко к ядру, так что его толщина была сопоставима с удалением от ядра, не использовали термин «bow shock», употребив менее определенное выражение «bow wave». Впервые факт формирования околокометной ударной волны при постепенном нагружении сверхзвукового

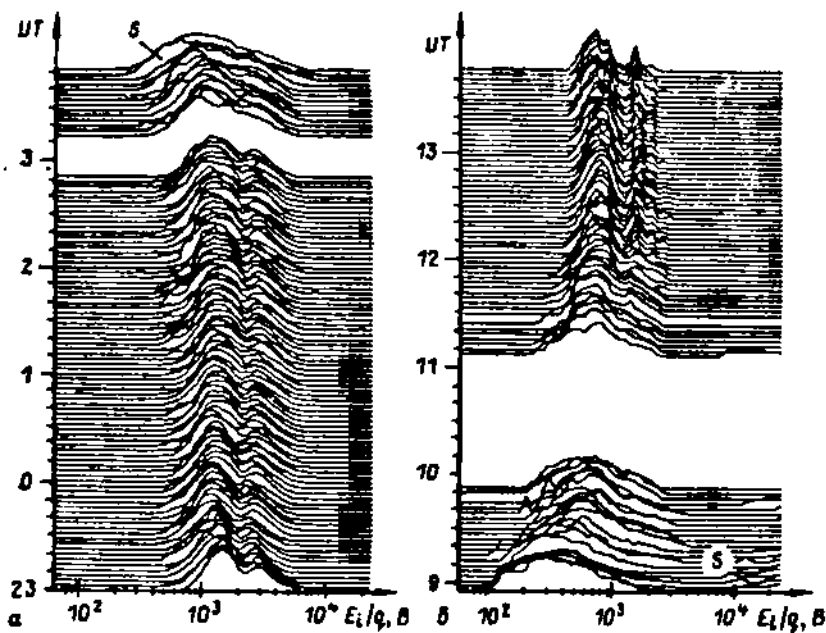


Рис. 7. Энергетические спектры ионов, измеренные АС анализатором эксперимента ПЛАЗМАГ-1 при пересечении ударной волны  $S$  на подлетной (а) и отлетной (б) частях траектории КА Вега 1

потока солнечного ветра ионами был установлен определенно после проведения плазменных измерений на Vega 1 [106, 148, 207].

На рис. 7 приведены энергетические спектры ионов, измеренные АС анализатором эксперимента ПЛАЗМАГ-1 5—6 марта 1986 г. при пересечении околокометной ударной волны на подлетной (а) и отлетной (б) частях траектории [10, 249]. При приближении к комете, за несколько часов до фронта ударной волны  $S$  ( $\approx 3.46$  UT,  $r \approx (10,2 \pm 0,1) \cdot 10^5$  км), кроме уже отмечавшегося постепенного торможения протонов, происходит и постепенное расширение энергетических спектров ионов — т. е. их температура возрастает (рис. 7 а). После двадцатиминутного перерыва в данных рост ионной температуры приводит к практическому слиянию пиков протонов и  $\alpha$ -частиц. Вскоре значительно увеличивается связанный с пересечением  $S$  градиент падения переносной скорости ионов, пики протонов и  $\alpha$ -частиц на энергетических спектрах становятся неразличимы.

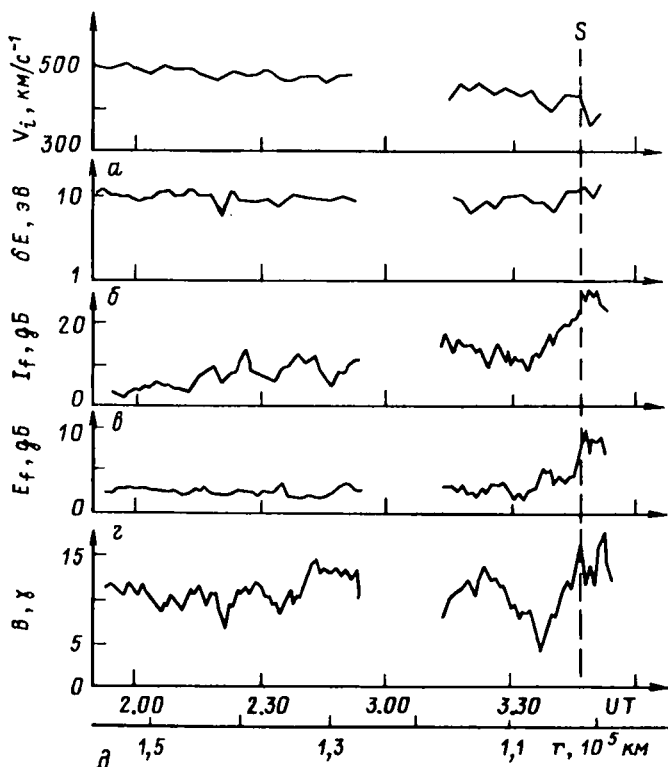


Рис. 8. Измерения характеристик потока плазмы в окрестности фронта околокометной ударной волны  $S$  по данным экспериментов ПЛАЗМАГ-1 (а, б), АПВ-Н (в, г) и МИША (д) на КА Vega 1



Об изменениях в окрестности S других характеристик потока плазмы можно судить по показанным на рис. 8 [13, 76] данным. Приведенные на этом рисунке скорость  $V(a)$  и эффективная температура  $\delta E(b)$  солнечного ветра оценивались, соответственно, как первый и второй моменты энергетического спектра ионов, измеренного АС анализатором; спектральная амплитуда флуктуаций потока ионов  $I_f(v)$  и электрического поля  $E_f(r)$  на частоте  $\approx 1,5$  Гц — по измерениям АПВ-Н; напряженность магнитного поля  $B(d)$  по данным магнитометра МИША.

Быстрый рост интенсивности плазменных волн на частотах меньших нижнего гибридного резонанса (рис. 8 в, г), по-видимому связан с их возбуждением кометными ионами, отраженными ударной волной. Измерения магнитного поля перед фронтом позволили оценить угол между магнитным полем и нормалью к фронту  $\nu_{\text{вн}} \approx 90^\circ$  и сделать вывод о том, что при подлете к комете Вега 1 пересекала квазиперпендикулярную ударную волну [13, 76]. Отраженные ударной волной и ускоренные при этом самосогласованным электрическим полем  $\vec{E} = -1/c[\dot{V}, \vec{B}]$  кометные ионы, образуют пучок, движущийся почти перпендикулярно магнитному полю и возбуждающий высокочастотные магнитозвуковые волны с частотами до частоты нижнего гибридного резонанса. Отношение спектральных амплитуд электрического и магнитного полей достаточно хорошо согласуется с ожидаемым для магнитозвуковых волн [13, 76]. Численное моделирование квазиперпендикулярной ударной волны, сформированной в плазме, нагруженной тяжелыми ионами [12], показывает, что из-за большой скорости циклотронного вращения отраженные ионы довольно легко проникают в область перед ударным фронтом, образуя подножие на профиле магнитного поля в ударной волне с характерным пространственным масштабом, порядка ларморовского радиуса тяжелых ионов  $r_{ci} \approx 10^4$  км.

Более сложная картина наблюдалась при пересечении околокометной ударной волны на отлетной части траектории Веги 1 (рис. 7 б). Здесь уровень МГД-турбулентности был выше, чем при подлете этого КА к ядру и значительный разогрев солнечного ветра происходил еще до фронта ударной волны при  $r \approx 1,3 \cdot 10^6$  км ( $\approx 12,20$  UT). Однако, наибольший градиент скорости плазмы в этом случае наблюдался в окрестности  $\approx 9,00$ — $9,30$  UT (рис. 7 б) и пересечение ударной волны при отлете Веги 1 от ядра происходило на  $r \approx (5,5 \pm 1) \cdot 10^5$  км [13, 76].

Следует отметить, что заметный разогрев протонов и  $\alpha$ -частиц солнечного ветра при приближении Веги 1 к комете также

начался при  $r \leq 1,3 \cdot 10^6$  км ( $\geq 2.30$  UT, рис. 7 а). Это расстояние, по-видимому, определяется только распределением концентрации нейтрального газа в окрестности кометы Галлея, и возрастания  $n_n$  до  $\approx 30$  см $^{-3}$  на  $r \approx 1,3 \cdot 10^6$  км от ядра [27, 203] достаточно для того, чтобы обеспечить заметный турбулентный разогрев ионов солнечного ветра, вызванный неустойчивым пучковым распределением продуктов ионизации кометного газа [10, 251].

Vega 2 зарегистрировала пересечение околокометной ударной волны только при подлете к комете (рис. 5 б). По совокупности измерений плазмы, магнитного поля и плазменных волн это пересечение произошло между 2.20 UT и 2.30 UT 9 марта 1986 г. на кометоцентрических расстояниях  $(13,6 \pm \pm 0,3) \cdot 10^6$  км, но структура фронта ударной волны была более диффузной чем наблюдалась на Vega 1 [13, 76]. Последнее обстоятельство отражает тот факт, что ударная волна была квазипараллельной с углом  $\nu_{\text{ва}} \approx 45^\circ$ . Существует глубокая аналогия между этим типом околокометной ударной волны и диффузионной ударной волной в космических лучах [211]. В обоих случаях энергичные частицы (протоны космических лучей или, в нашем случае, захваченные солнечным ветром тяжелые ионы), двигаясь вдоль магнитного поля возбуждают интенсивную альвеновскую турбулентность и уход этих частиц от фронта имеет диффузионный характер. Пространственный масштаб диффузии и определяет характерную толщину квазипараллельной ударной волны [13, 76]:

$$L_d \approx r_{c1} \cdot B^2 / \sum_k |B_k|^2 \approx (5-10) \cdot 10^4 \text{ км.} \quad (6)$$

При численной оценке выражения (6) использовались оценки плотности энергии возбуждаемых волн  $\sum_k |B_k|^2$  по данным магнитометра МИША на Vega 2.

По данным плазменных измерений на Giotto фронт ударной волны был зарегистрирован 13 марта 1986 г. В 19.23 UT на  $r \approx 1,15 \cdot 10^6$  км от кометного ядра на подлетной части траектории [177, 202], его толщина составляла  $\approx 4 \cdot 10^4$  км [53]. Как и на Vega 1, более сложная картина наблюдалась на отлетной части траектории Giotto. Пересечение фронта ударной волны здесь происходило 14 марта с  $\approx 2.30$  до  $\approx 3.05$  UT на протяжении  $\approx 1,4 \cdot 10^6$  км на кометоцентрическом расстоянии  $r \approx 7 \cdot 10^6$  км [177].

Разогрев и торможение плазмы на фронте ударной волны приводит к тому, что (обсуждавшиеся в части 3) оболочки кометных протонов по данным датчика HERS масспектрометра IMS сливаются с разогретыми протонами солнечного ветра [183, 184]. Сопоставление одновременных измерений функций распределения протонов и кометных ионов группы воды (датчик IIS, эксперимент JPA) показывает, что расширение угло-

вого распределения последних происходит на  $\approx 2-3$  мин раньше, чем для протонов [256], т. е. на расстоянии порядка гирорадиуса тяжелых ионов. По данным этого эксперимента концентрация захваченных ионов группы воды в окрестности  $s$  возросла в  $\approx 1,5-2$  раза с  $0,03-0,035 \text{ см}^{-3}$  до  $0,05-0,06 \text{ см}^{-3}$  [257]. Детальный анализ данных анализатора FIS эксперимента JPA в окрестности фронта ударной волны при подлете Giotto к комете выявил сложную структуру кратковременных падений скорости солнечного ветра в области предвестников (foreshock) за  $2,5 \cdot 10^6 \text{ км}$  до ее основного уменьшения на фронте [53]. В этой же области по данным электронных анализаторов EESA на Giotto и AE на Vega 2 наблюдались повышенные значения электронной температуры [20, 202].

Наиболее отчетливо пересечение фронта околокометной ударной волны были зарегистрировано на КА Suisei при его отлете от кометы Галлея. На рис. 9 показаны значения скорости и концентрации протонов солнечного ветра в окрестности фронта ударной волны  $s$  пересекавшей этим КА на  $r \approx 4,5 \cdot 10^6 \text{ км}$  [173]. Возможно, что значительный скачок  $v$ , наблюдавшийся на Suisei, связан с тем, что этот КА пересекал  $S$  ближе к подсолнечной точке, чем остальные КА (рис. 1), хотя нельзя исключить также, что пересечение фронта ударной волны Suisei совпадало с прохождением через комету высокоскоростного потока солнечного ветра, наблюдавшегося на Vega 2 (см. рис. 7 в работе [40]).

Все обсуждавшиеся выше случаи локальных пересечений фронта околокометной ударной волны строго говоря нельзя

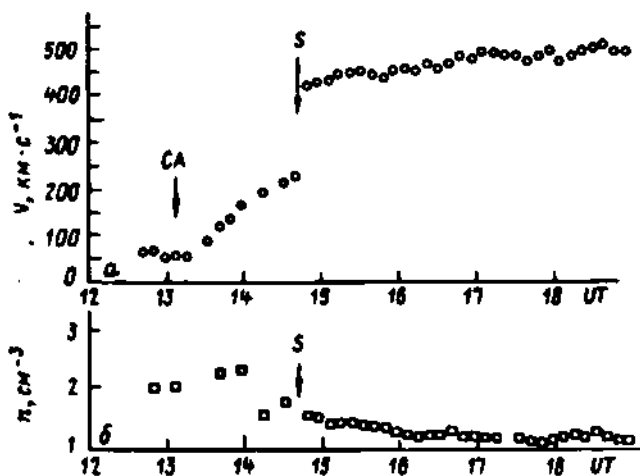


Рис. 9. Скорость (а) и концентрация (б) протонов солнечного ветра в окрестности фронта околокометной ударной волны по данным энергоспектрометра ESP на КА Suisei. CA — наибольшее приближение этого КА к ядру кометы Галлея

рассматривать как доказывающие его квазистационарное существование в виде охватывающей комету поверхности. Однако, как будет показано ниже, уникальный характер неравновесного распределения плазмы в области за фронтом ударной волны — кометошита, позволяет получить этому достаточно убедительное подтверждение.

Термин кометошит для обозначения области за фронтом околокометной ударной волны был предложен в [18, 106] для того, чтобы отметить принципиальное различие между физическими процессами, происходящими в ней, и процессами, определяющими формирование магнитошита у планет с сильным собственным магнитным полем, или ионошита у планет с намного более сильными гравитационными полями по сравнению с кометами. Это различие связано с тем, что околокометная ударная волна, в отличие от околопланетных, образуется не в результате сжатия и разогрева потока сверхзвуковой плазмы на достаточно жестком препятствии (магнитопауза, ионопауза), а в результате его нагружения тяжелыми кометными ионами.

Наиболее характерной особенностью кометошита, очевидной из представленных рис. 10 данных, является присутствие в этой области нескольких ветвей в энергетическом распределении ионов. На рис. 10 а показаны энергетические спектры ионов, измеренные АС анализатором эксперимента ПЛАЗМАГ-1 на КА Вега 1 (а), и датчиком IIS ( $m_i = 10-20$ ) эксперимента JPA на КА Giotto (б).  $P$  — ветвь протонов (и  $\alpha$ -частиц) солнечного ветра,  $G_1, G_2$  — ветви кометных ионов группы воды

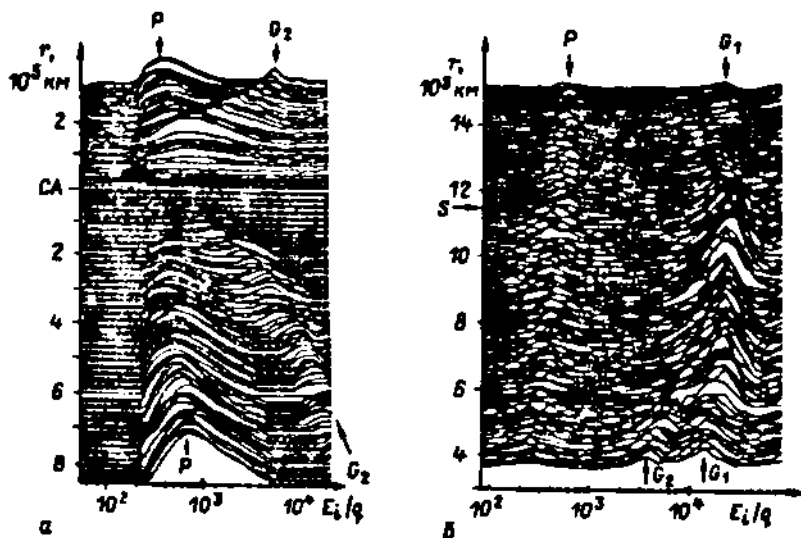


Рис. 10. Энергетические спектры ионов, измеренные АС анализатором эксперимента ПЛАЗМАГ-1 на КА Вега 1 (а), и датчиком IIS ( $m_i = 10-20$ ) эксперимента JPA на КА Giotto (б).  $P$  — ветвь протонов (и  $\alpha$ -частиц) солнечного ветра,  $G_1, G_2$  — ветви кометных ионов группы воды

КА Вега 2 [18, 106]. Очевидно присутствие двух ветвей в энергетическом распределении ионов. Левая, менее энергичная из них  $P$ , создана термализованными и заторможенными на фронте околокометной ударной волны протонами и  $\alpha$ -частицами солнечного ветра. Более энергичная правая ветвь  $G_2$  создана кометными ионами.

При углублении в кометошит энергия протонов постепенно уменьшается. Энергия кометных ионов, регистрируемых АС-анализатором, уменьшается значительно быстрее, так что отношение энергий ионов в обоих ветвях тоже уменьшается [10, 249]. На расстояниях  $\approx (3-4) \cdot 10^5$  км от ядра скорость кометных ионов в направлении этого анализатора уменьшается до скорости протонов, их потоки становятся сопоставимыми с потоками протонов. После этого скорость уменьшения энергии кометных ионов, регистрируемых АС-анализатором, еще более возрастает, тогда как энергия протонов остается практически неизменной. В окрестности кометопаузы ( $r \approx 1,6 \cdot 10^5$  км, см. следующую часть обзора), отделяющей кометошит от области кометной плазмы, протоны, происходящие из солнечного ветра исчезают из поля зрения АС-анализатора; характерная величина энергии ионов в ветви  $G_2$  близка к  $\approx 1$  кэВ (рис. 10 а).

Кроме ветви кометных ионов  $G_2$  в плазме кометошита при помощи датчика IIS (позволявшего оценить и массу ионов) эксперимента JPA на КА Giotto была обнаружена и более энергичная ветвь  $G_1$  [137]. На рис. 10 б показаны энергетические спектры ионов группы воды (регистрация ветви протонов  $P$  с малой эффективностью — побочный эффект прибора) по данным IIS, суммированные по всем пяти полярным направлениям регистрирующих систем этого датчика на протяжении 32 оборотов КА (128 с) [242]. Как и на Вега 1 энергия кометных ионов в ветви  $G_2$  быстро уменьшается с уменьшением  $r$ , однако одновременно с ней присутствует и ветвь более энергичных ионов энергия которых изменяется существенно меньше (рис. 10 б).

Происхождение двух ветвей  $G_{1,2}$  на энергетических спектрах кометных ионов обсуждалось в [10, 249, 242] и можно считать надежно установленным, что кометные ионы в ветви  $G_1$  образовались далеко вверх по потоку от точки наблюдения, а в ветви  $G_2$  — в окрестности КА (ветвь  $G_1$  по данным АС анализатора не наблюдалась, поскольку во время пролета Веги 1 скорость солнечного ветра была в  $540/340 \approx 1,6$  раз больше, а энергия захваченных ионов в  $\approx 2,5$  раза больше, чем во время пролета Giotto, и выходила за диапазон энергий, измеряемых этим анализатором). Однако, при непрерывном торможении потока обтекающей комету плазмы энергетический спектр захваченных ионов должен иметь только один максимум. В чем же причина образования двух максимумов  $G_1$  и  $G_2$  (рис. 10 б) на их энергетическом спектре?

Причиной формирования двух максимумов на энергетических спектрах захваченных кометных ионов является присутствие в околокометном пространстве ударной волны — разрыва где происходит быстрое падение скорости обтекающей комету плазмы. Действительно, кометные ионы, регистрируемые на КА в данный момент времени, образовались вверх по потоку вдоль проходящей через КА линии тока плазмы. С приближением КА к комете эта линия тока пересекает ударную волну все ближе к подсолнечной точке, и скачок скорости плазмы на ней все увеличивается. Таким образом, с уменьшением  $r$  все увеличивается диапазон скоростей при которых не происходило захвата вновь образовавшихся ионов, что объясняет присутствие провала между двумя пиками на энергетических спектрах захваченных кометных ионов и увеличение расстояния между ними с уменьшением  $r$  (рис. 10 б).

Основной особенностью распределения магнитного поля в кометошите является его систематическое возрастание с приближением к ядру кометы. На рис. 11 показаны результаты измерения магнитного поля в окрестности кометы Галлея магнитометрами МИША на КА Vega 1 (а), Vega 2 (б) [207] и магнитометром MAG на КА Giotto (в) [180]. Рост магнитного поля не является монотонным и сопровождается значительными вариациями как величины так и направления. Некоторые из них, возможно, связаны с присутствием в кометошите характерных границ [28, 230]. Ряд особенностей, наблюдавшихся в результатах эксперимента АПВ-Н также может быть интер-

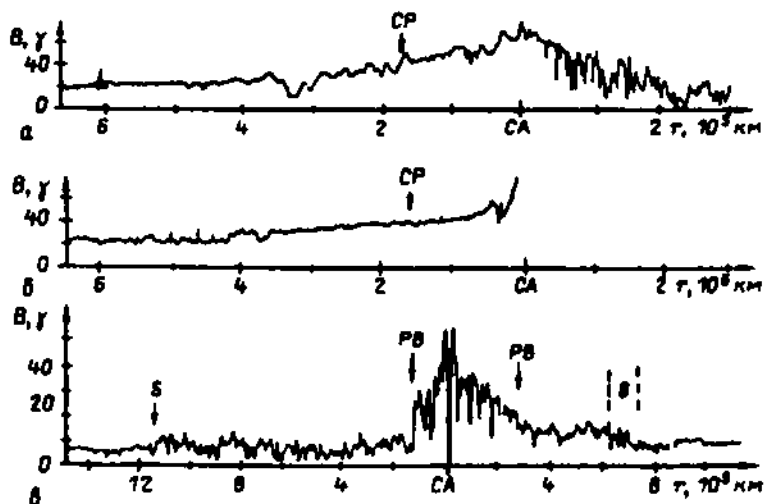


Рис. 11. Результаты измерения магнитного поля в окрестности кометы Галлея с помощью магнитометров МИША на КА Vega 1 (а), Vega 2 (б) и магнитометра MAG на КА Giotto (в)

претирован как пересечение таких границ в кометошите [188, 189, 221]. Так по данным этого эксперимента на «вторичной волне» ( $r \approx (7-8) \cdot 10^5$  км) происходило увеличение флуктуаций электрического поля и потока плазмы на частотах 100—100 Гц, в спектре флуктуаций электрического поля присутствовало также два пика на частотах 15 Гц и 100 Гц, вероятно связанных с возбуждением шланговой неустойчивостью магнитозвуковых или нижнегибридных волн [149]. На «внешней границе мантии» ( $r \approx 4 \cdot 10^5$  км), выделяющейся в плазменном канале АПВ-Н в частотном диапазоне 150—950 Гц, спектр флуктуаций электрического поля в диапазоне 1—100 Гц в значительной степени похож на спектры вблизи вторичной волны. Однако, на частотах 100—1000 Гц его характер изменяется, приближаясь к спектру равномерного шума. Такой излом спектра по-видимому свидетельствует о наличии двух процессов разной природы. Эта граница практически совпадает с границей  $M1$ , определенной в [230] по началу более быстрого роста абсолютной величины магнитного поля. Упомянутые в этом абзаце границы еще не являются общепринятыми, нельзя исключить, что они отчасти связаны с временными вариациями потока солнечной плазмы, и необходим подробный комплексный анализ происходящих на них процессов.

О необходимости в дальнейшем такого анализа свидетельствует и проведенное на рис. 12 сравнение результатов измерения электронной компоненты плазмы на КА Вега 2 (а, б) и Giotto (б, г). Приведенные на этом рисунке значения температуры  $T_e$  и концентрации электронной  $n_e$  компоненты плазмы были рассчитаны по данным анализаторов АЕ эксперимента ПЛАЗМАГ 1 [20, 109] и EESA эксперимента RPA [59, 200]. Анализируя результаты измерений электронной компоненты плазмы в кометошите с борта Giotto, их авторы выделили в кометошите «загадочную область» (mystery region, обозначена  $mr$  на рис. 12), расположенную в диапазоне кометоцентрических расстояний  $8,5 \cdot 10^5$  км  $\leq r \leq 5,5 \cdot 10^5$  км и характеризующуюся повышенными значениями электронной концентрации (особенно для энергичных электронов) и температуры, и повышенными, более высокочастотными их вариациями по сравнению с окружающими областями кометошита [60, 202]. По данным датчика HERS эксперимента IMS в  $mr$  наблюдалось также приблизительно трехкратное увеличение концентрации  $\alpha$ -частиц — второй по содержанию компоненты солнечного ветра [86, 87]. На выходе Giotto из  $mr$  наблюдалось также достаточно резкое изменение энергетических спектров захваченных тяжелых кометных ионов (рис. 10 б) [257], связанное с падением переносной скорости солнечного ветра [242]. Однако на Вега 2 в кометошите изменений характеристик электронной компоненты плазмы, аналогичных наблюдавшимся на Giotto, отмечено не было (ср. рис. 12 а, б и рис. 12 в, г). Это дает основание

предположить, что связанные с  $mr$  изменения характеристик плазмы в кометошите, наблюдавшиеся на Giotto, не являются постоянной особенностью этой области, а вызваны соответствующим изменением параметров обтекающего комету солнечного ветра.

Кроме несовпадающих вариаций отдельных характеристик электронной компоненты плазмы в кометошите, из приведенных на рис. 12 а, б данных можно видеть и общую особенность распределения электронной компоненты плазмы в этой области — систематическое уменьшение электронной температуры с уменьшением  $r$ . По данным АЕ и EESA анализаторов при перемещении Веги 2 и Giotto от ударной волны BS к кометоплаузе CP ( $r \approx 1,6 \cdot 10^5$  км)  $T_e$  уменьшилась на  $(1-2) \cdot 10^5$  К (рис. 12 а, б). Наблюдавшееся на обоих КА охлаждение электронной компоненты плазмы в кометошите на 10—20 эВ, по-видимому, связано с потерями энергии электронами в процессе их неупругих столкновений с кометным нейтральным газом [20, 109, 111].

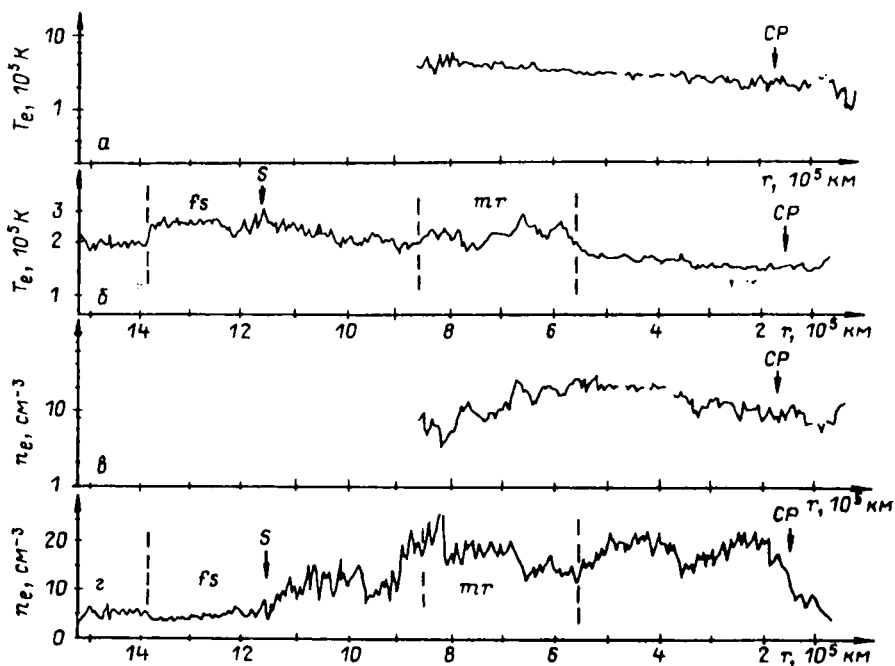


Рис. 12. Кометоцентрические профили температуры  $T_e$  и концентрации  $n_e$  электронной компоненты плазмы, оцененные по данным АЕ анализатора эксперимента ПЛАЗМАГ-1 на КА Вега 2 (а, в) и EESA анализатора эксперимента RPA на КА Giotto (б, г)



Действительно, на  $r \approx 1,6 \cdot 10^6$  км концентрация нейтральных молекул составляет  $n_n \sim 5 \cdot 10^8$  см $^{-3}$  [27, 203]. Потери энергии электрона на неупругих столкновениях при движении его сквозь водяной пар такой плотности составляют  $n_n L_e \approx 2 \cdot 10^{-11}$  эВ/см, где  $L_e \approx 4 \cdot 10^{-15}$  см $^2$  эВ — значение функции потерь энергии электрона при  $E_e \approx 40$  эВ [190]. При скорости течения плазмы  $V \approx 200$  км/с [107] характерное время обтекания составит  $\tau \approx 2r/V \approx 1,5 \cdot 10^3$  с (с учетом того, что КА приближаются к ядру под углом  $\varphi \approx 110^\circ$  с направлением на Солнце). За это время электрон, движущийся со скоростью  $4 \cdot 10^8$  км/с пролетит  $\approx 6 \cdot 10^6$  км и потеряет на этом пути энергию  $\approx 12$  эВ. Эта величина сравнима с наблюдавшимся систематическим охлаждением электронной компоненты плазмы.

Кроме обсуждавшихся выше крупномасштабных характеристик плазмы в кометошите, ее течение в этой области характеризуется еще более высоким уровнем МГД-турбулентности, чем до ударной волны. Пример регистрации в кометошите значительных вариаций потока плазмы с характерным временем 20—30 с приведен на рис. 13 [10, 249, 251]. На этом рисунке показаны спектрограммы ионных потоков, полученные на  $r \approx 7,4 \cdot 10^5$  км при помощи АК и АС анализаторов эксперимента

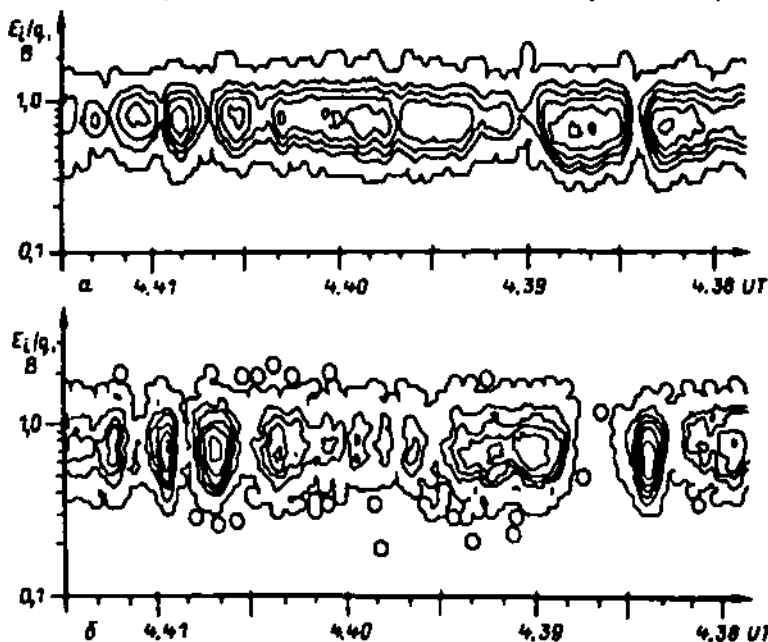


Рис. 13. Пример регистрации вариаций направления плазмы в кометошите кометы Галлея. При уменьшении ионных потоков, регистрируемых АС — анализатором (а), происходит одновременное увеличение ионных потоков, регистрируемых АК — анализатором (б)

ПЛАЗМАГ-1 на КА Вега 2. На спектрограммах АС анализатора (рис. 13а) самым внешним изолинией соответствует скорость счета датчика  $f_0 \approx 2 \cdot 10^3 \text{ с}^{-1}$ , на спектрограммах АК анализатора (рис. 13б) —  $f_0 \approx 10^4 \text{ с}^{-1}$ . При переходе к следующим внутренним изолиниям скорость счета анализаторов увеличивается в 1,4 раза.

Наблюдавшиеся в показаниях обоих датчиков вариации интенсивности потока ионов можно связать с вариациями направления ионного потока в кометошите. Действительно, при уменьшении потока ионов в направлении АК-анализатора одновременно происходит увеличение интенсивности ионного потока в АС-анализаторе, и наоборот. Величину отклонения потока ионов от первоначального направления можно оценить как

$$\delta\alpha \approx \frac{2kT_p}{m_p V^2} \ln \left( \frac{f_{\max}}{f_{\min}} \right) \approx 5^\circ \text{ при температуре протонов в кометошите}$$

$T_p \approx 3 \cdot 10^5 \text{ К}$ , их переносной скорости  $V \approx 350 \text{ км/с}$  и  $f_{\max}/f_{\min} \approx 3-5$  [10, 251]. Сильная МГД-турбулентность с пиком на частоте  $\sim 10^{-2} \text{ Гц}$  наблюдалась также по измерениям магнитного поля [243] и электронной компоненты плазмы [91] в кометошите кометы Джакобини-Циннера на космическом аппарате ICE.

Следует отметить также присутствие в кометошите и более крупномасштабной МГД-турбулентности с характерными временами 10—15 мин [10, 249, 251]. Выполненный в [165] анализ спектров флуктуаций электрического поля, магнитного поля и концентрации плазмы по данным экспериментов АПВ-В и МИ-ША на КА Вега 1 показал, что отношение амплитуд электрического и магнитного полей в турбулентности такого масштаба пропорционально альевеновской скорости, что согласуется с МГД-природой этой турбулентности.

## 5. КОМЕТОПАУЗА И ОБЛАСТЬ КОМЕТНОЙ ПЛАЗМЫ

Наиболее неожиданным результатом плазменных измерений на КА Вега-1,2 явилось обнаружение на  $r \approx 1,6 \cdot 10^5 \text{ км}$  новой, не предсказанной теорией границы — кометопаузы, разделяющей кометошит, контролируемый потоком протонов солнечного ветра, и область кометной плазмы с преобладанием тяжелых, медленно движущихся кометных ионов. Эта граница была обнаружена в ходе выполнения плазменного эксперимента ПЛАЗМАГ-1 на космических аппаратах Вега 1,2 [18, 104, 106, 107]. Существование кометопаузы было подтверждено как по данным волнового эксперимента АПВ-Н на этих же КА [220], так и в экспериментах РРА и ЖРА на Giotto [150, 37]. Перед обсуждением особенностей проявления кометопаузы в данных плазменных экспериментов на различных КА рассмотрим физические процессы, происходящие в ее окрестности, по результатам одно-

временных измерений плазмы магнитного поля и волн на КА Вега 2 [8, 80, 81].

На рис. 14а приведена детальная спектрограмма результатов измерения ионных потоков в окрестности кометопаузы CP с помощью АК-анализатора эксперимента ПЛАЗМАГ-1. Изолинии скорости счета этого анализатора построены с инкрементом  $440 \text{ с}^{-1}$ , самые внешние из них соответствуют скорости счета  $10^3 \text{ с}^{-1}$ . Как можно видеть из приведенных на рис. 14а данных, в окрестности кометопаузы (6.43—6.45 UT,  $r \approx (1,7-1,6) \cdot 10^5 \text{ км}$ ) происходит значительное увеличение энергии/заряд ионов, регистрируемых АК-анализатором. Это увеличение связано как с изменением функции распределения протонов по скоростям в окрестности кометопаузы, так и с происходящим с большим пространственным масштабом изменением массового состава плазмы, в результате которого преобладающие в кометошите протоны ( $E_p \approx 170 \text{ эВ}$ ) замещаются ионами группы воды ( $E_i \approx 900 \text{ эВ}$ ) [8, 80, 81]. Поток протонов, регистрируемых АК-анализатором, после кометопаузы значительно уменьшается, однако при этом расширяется их энергетический спектр [104, 107] и увеличивается средняя энергия до  $E_p \approx 250 \text{ эВ}$ .

Перед кометопаузой энергетические спектры ионов, регистрируемых АС-анализатором имеют два максимума (см. рис. 10а). Во время проведения эксперимента на Вега 2 средняя энергия менее энергичных протонов составляла  $E_p \approx 300 \text{ эВ}$ . Типичная энергия более энергичных ионов группы воды ( $m_i \approx 16-18$ ) при этом была  $\approx 900 \text{ эВ}$ . После кометопаузы протоны в направлении АС-анализатора практически перестают регистрироваться, средняя энергия тяжелых ионов остается практически неизменной [104, 107].

Измеренные АЕ-анализатором энергетические спектры электронов и, следовательно, концентрация плазмы и температура электронов (рис. 12а,б) при пересечении Вегой 2 кометопаузы не испытывали существенных изменений. Об отсутствии существенных изменений концентрации плазмы свидетельствует и практическое постоянство величины магнитного поля в окрестности этой границы (рис. 11а,б): незначительные изменения наблюдались только в  $B_y$  и  $B_z$  компонентах магнитного поля [28, 104].

Однако в окрестности кометопаузы на Вега 2 в эксперименте АПВ-В был отмечен быстрый (на протяжении  $\approx 2$  мин) рост амплитуды колебаний электрического поля в нижнегибридном (8—14 Гц) диапазоне частот и зарегистрированы колебания потока плазмы в вистлеровом диапазоне частот, причем частота, на которой интенсивность этих волн максимальна, с 6.30 UT по 6.50 UT возрастала от  $\approx 250 \text{ Гц}$  до  $\approx 950 \text{ Гц}$  [80, 81].

О присутствии в районе кометопаузы волновой активности в более низкочастотном диапазоне можно сделать вывод из представленных на рис. 14 данных. Регулярные вариации потока регистрируемых АК-анализатором ионов с временным масштабом

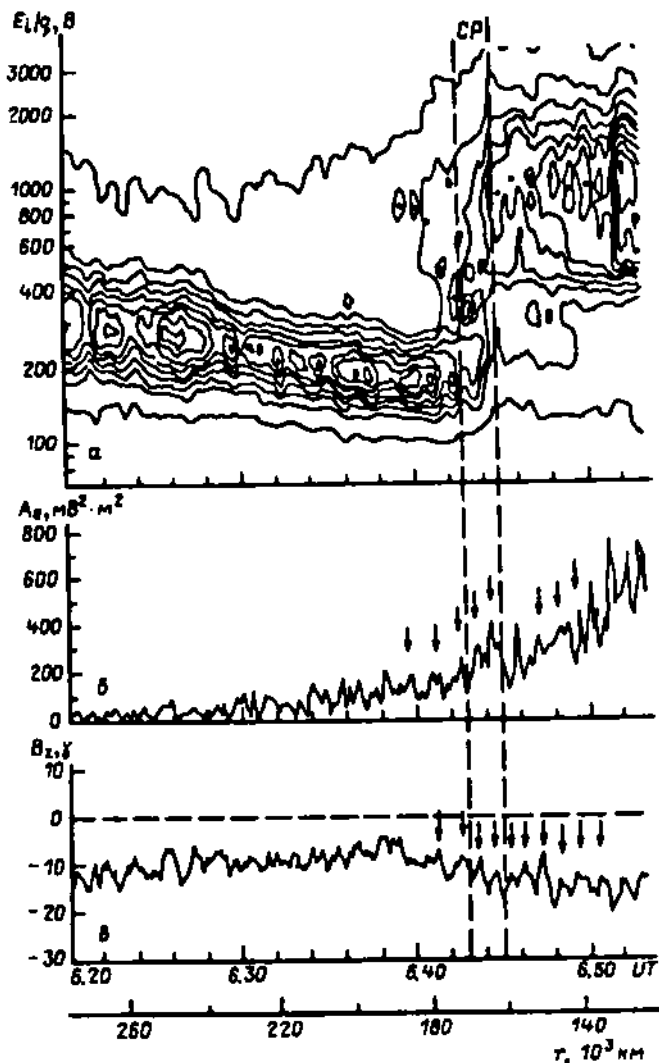


Рис. 14. Спектрограмма потоков ионов (а, ПЛАЗМАГ-1), амплитуды колебаний электрического поля (б, АПВ-Н), и  $B_z$  компоненты магнитного поля (в, МИША) по данным измерений на КА Вега-2 в окрестности кометопазы (СП).

$\approx 1$  мин (отмечены точками на рис. 14а) присутствуют по крайней мере в десятиминутной окрестности этой границы. Сравнение с одновременными данными АС-анализатора показывает, что изменения потоков ионов, приходящих в эти датчики происходит в противофазе. Это свидетельствует о присутствии в окрестности кометопазы крупномасштабных МГД-вариаций направления

возбужденные ею МГД волны сопровождаются вистлерами с угловой скоростью с характерным периодом  $T \approx 1$  мин. Крупномасштабные МГД-вариации потока плазмы проявляются также в вариациях амплитуды колебаний электрического поля в нижнегибридном диапазоне частот (рис. 14б) и в вариациях  $B_z$  компоненты магнитного поля (рис. 14в) [8, 80, 81].

Быстрое, на протяжении  $\approx 2$  минут ( $\approx 10^4$  км вдоль траектории Веги 2) уменьшение потоков протонов, регистрируемых АК и АС-анализаторами, невозможно объяснить без привлечения бесстолкновительных механизмов торможения и изотропизации распределения протонов вследствие их движения относительно кометных ионов. Возможная векторная диаграмма скорости протонов относительно кометы  $V_p \approx 200$  км/с и относительно КА  $V_{pr} \approx 250$  км/с перед кометопазузой (в системе координат, связанной с КА) приведена на рис. 15 [8, 80, 81]. Здесь же показаны сектора зрения АК- и АС-анализаторов, а вертикальной штриховкой отмечены возможные области пространства скоростей из которых протоны попадали в эти анализаторы. Аналогичную векторную диаграмму можно построить и для тяжелых кометных ионов в окрестности кометопазузы. По данным АК- и АС-анализаторов их скорость относительно кометы может быть оценена как  $V_i \approx 60$  км/с, и относительно КА как  $V_{ir} \approx 120$  км/с (рис. 15). В результате развития нерезонансной шланговой неустойчивости движения протонов и кометных ионов относительно вновь образующихся кометных ионов происходит торможение протонов и их рассеяние по питч-углам (пунктирные окружности на рис. 15), что приводит к падению интенсивности потока протонов регистрируемого АК- и АС-анализаторами. Другая неустойчивость — резонансная ионно-циклотронная, также имеет инкремент порядка ионной циклотронной частоты. Однако возбужден-

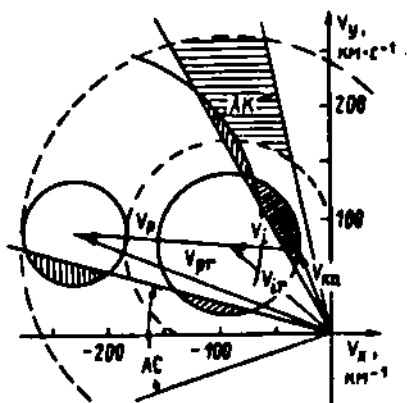


Рис. 15. Возможная векторная диаграмма скоростей протонов ( $p$ ) и кометных ионов ( $i$ ) относительно КА ( $V_p, V_i$ ) и кометы ( $V_{pr}, V_{ir}$ ) в окрестности кометопазузы

ные ею МГД волны сопровождаются вистлерами с укороченными краями [244], которые в нашем случае не наблюдались (с точностью до имевшегося временного разрешения магнитометра 10 Гц) [81].

Быстрая изотропизация протонов в окрестности кометоплаузы вовсе не свидетельствует о столь же быстром уменьшении их концентрации, хотя увеличивает скорость этого процесса в несколько раз. Характерное время перезарядки протонов следует теперь определять по их полной скорости

$\tau_{ct} \approx (\sigma_{ct} V_p n_n)^{-1} \approx 5 \cdot 10^3$  с, где  $\sigma_{ct} \approx 2 \cdot 10^{-15}$  см<sup>2</sup> — сечение перезарядки,  $n_n \approx 5 \cdot 10^3$  см<sup>-3</sup> — концентрация нейтрального газа в  $V_p \approx 200$  км/с — скорость течения протонов перед кометоплаузой, приблизительно равная скорости их гировращения на кометоплаузе и за ней вследствие питч-углового рассеяния на возбуждаемых колебаниях. Оцененное выше  $\tau_{ct}$  сравнимо с характерным временем обтекания кометы потоком плазмы за кометоплаузой  $\approx 2 \cdot r/V_1 \approx 5 \cdot 10^3$  с<sup>-1</sup> при  $V_1 \approx 60$  км/с, что свидетельствует об эффективности перезарядки в этой области [8, 80, 81].

Однако даже при таком времени перезарядки характерный масштаб убывания концентрации протонов (и  $\alpha$ -частиц) солнечного ветра в окрестности кометоплаузы составляет несколько десятков тысяч километров. Эта величина вполне соответствует наблюдавшемуся в эксперименте IMS (датчик HERS) на КА Giotto характерному масштабу убывания концентрации протонов и  $\alpha$ -частиц в окрестности кометоплаузы [72, 234].

Следствием присутствия пучка кометных ионов в потоке плазмы является повышенная интенсивность плазменных волн вблизи кометоплаузы в нижнегибридном диапазоне частот. Эти волны, в свою очередь, ускоряют находящиеся с ними в резонансе надтепловые электроны. В результате возникающей анизотропии распределения электронов по скоростям в плазме возбуждаются косые высокочастотные ленгмюровские волны (свистовые в плазме с высоким  $\beta$ ), причем частота, на которой интенсивность этих волн максимальна, возрастает по мере торможения плазмы в окрестности кометоплаузы [8, 80, 81]. Повышенный уровень нижнегибридных и свистовых колебаний плазмы является лишь следствием быстрого нагружения солнечного ветра у этой границы, а не их причиной.

Достаточно полное, самосогласованное описание физических процессов в окрестности кометоплаузы в настоящее время отсутствует. Их понимание затрудняется также изменчивостью обтекающего комету солнечного ветра. Так, например, в отличие от результатов измерения магнитного поля на КА Vega 1, 2, при полете КА Giotto к комете Галлея на  $r \approx 1,35 \cdot 10^6$  км наблюдался резкий рост абсолютной величины магнитного поля (ср. рис. 11 а, б и рис. 11 в) от  $\approx 10\gamma$  до  $\approx 30\gamma$  [179,

180]. Этот скачок, названный авторами магнитных измерений границей области нагружения (pile-up boundary. PB на рис. 11 в) сопровождался значительными изменениями некоторых параметров потока плазмы и во многих публикациях результатов плазменных экспериментов, проведенных на КА Giotto, соответствующие события интерпретируются как пересечение кометопазы (CP) этим КА. Однако отсутствие скачка магнитного поля в окрестности кометопазы по данным магнитных измерений на двух других КА Vega 1, 2, пересекающих эту границу, заставляет предположить, что скачок *B* не является необходимой особенностью кометопазы, а является следствием изменений в межпланетном магнитном поле.

Коротко остановимся на других особенностях плазменных наблюдений на Giotto в окрестности кометопазы. По данным датчика EESA эксперимента RPA на PB произошло уменьшение концентрации электронов (с энергией  $\geq 10$  эВ) с  $\approx 9,5 \text{ см}^{-3}$  до  $\approx 7 \text{ см}^{-3}$  причем их функция распределения стала анизотропной [59, 60, 61]. Пространственный масштаб этих изменений не превышал  $\approx 10^4$  км. Данные датчиков FIS и IIS эксперимента JPA в окрестности кометопазы проанализированы в работе [37]. По данным FIS скорость счета кометных ионов превысила скорость счета протонов солнечного ветра на  $r \approx 1,7 \cdot 10^5$  км. Ближе к ядру, при  $r 1,5 \cdot 10^5$  км тяжелые кометные ионы стали регистрироваться ориентированным по  $V_{\text{ка}}$  датчиком PICCA эксперимента RPA [150].

В работах [90, 218] предпринимались попытки описать процессы происходящие на кометопазе в рамках многожидкостных (протоны солнечного ветра, кометные ионы, электроны) моделей. В первой из них положение кометопазы в подсолнечной точке достаточно произвольно отождествлено с местом, где сравниваются возрастающая плотность кометных ионов и убывающая плотность протонов солнечного ветра. Во второй — кометопаза интерпретируется как ударная волна в многожидкостном потоке. Содержащиеся в обеих работах выводы представляются в значительной степени умозрительными, поскольку детального сравнения с имеющимися экспериментальными данными в них не проведено. Отдельно стоит публикация [37], в которой сообщалось о начале проработки модели кометопазы создаваемой явлением критической ионизационной скорости. Наконец в работе [219] в использовавшейся ранее многожидкостной модели [218] учтено влияние теплового давления захваченных кометных ионов. Согласно [219] в окрестности кометопазы скорость потока обтекающей комету плазмы сравнивается с альвеновской скоростью, а в окрестности ударной волны — с ионнозвуковой скоростью. В этой модели околокометной ударной волны в традиционном смысле не существует [219]. Последнее обстоятельство, находящееся в очевидном противоречии с наблюдавшимся в плаз-

менных экспериментах расщепления ветвей  $G_1$  и  $G_2$  в кометоплите (см. 10 и его обсуждение в части 4), заставляет относиться осторожно и к применимости использовавшейся в [219] модели в окрестности кометоплазы.

Рассмотрим теперь изменения характеристик потока обтекающей комету плазмы, наблюдавшиеся при дальнейшем приближении космических аппаратов Вега 1,2 и «Giotto» к ядру кометы Галей. В области кометной плазмы (рис. 1) происходит дополнительное торможение потока ионов (уже в основном тяжелых, кометного происхождения) от скоростей порядка нескольких десятков километров в секунду у кометоплазы (рис. 15) до нескольких километров в секунду на  $r \approx 5 \cdot 10^4$  км. На рис. 16 [152, 153] приведены результаты оценки радиальной компоненты скорости  $V_i$  и температуры  $T_i$  ионов

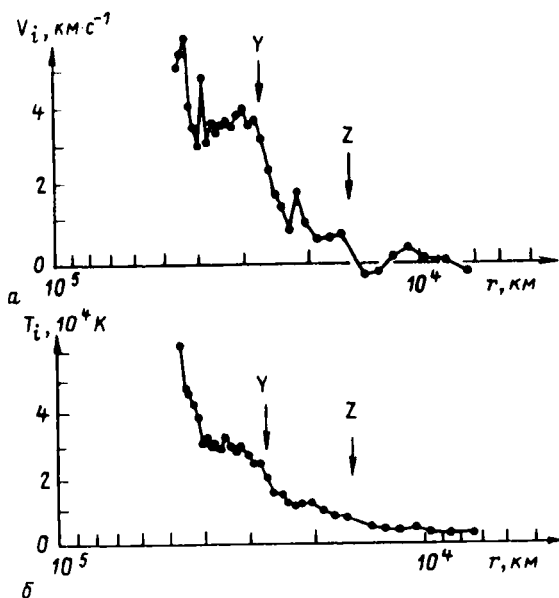


Рис. 16. Радиальная компонента скорости  $V_i$  (а) и температура ионов группы воды  $T_i$  (б), оцененная по данным энергоспектрометра PICCA на КА Giotto

группы воды по данным энергоанализатора PICCA эксперимента RPA на КА «Giotto». Как видно из приведенных на этом рисунке данных, обтекающая комету плазма практически останавливается ( $V_i \leq 1$  км/с) при  $r \leq 2 \cdot 10^4$  км, где одновременно наблюдаются весьма низкие значения  $T_i \leq 10^4$  К.

В условиях когда тепловая и направленная скорости ионов малы по сравнению с  $V_{КА}$ , скорость всех ионов, приходящих на КА, становится близкой к этой величине и энергетические спектры ионов можно интерпретировать как массовые.



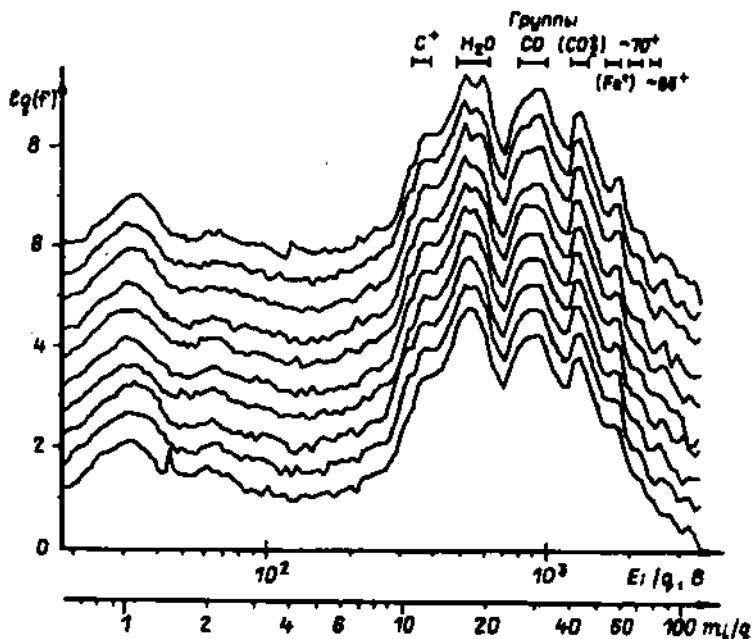


Рис. 17. Спектры кометных ионов, измеренные АК-анализатором эксперимента ПЛАЗМАГ-1 на КА Вега 2 на расстояниях  $(1,4-1,7) \cdot 10^6$  км от ядра в области кометной плазмы

На рис. 17 показаны энергетические спектры ионов, зарегистрированные АК-анализатором эксперимента ПЛАЗМАГ-1 [19, 108, 110]. Приведенные на этом рисунке усредненные по 4 сек интервалам времени спектры были измерены на  $r = (1,4-1,7) \cdot 10^6$  км от ядра. На основании приведенных на рис. 17 данных можно достаточно уверенно говорить о присутствии в кометной плазме ионов  $H^+$ ,  $C^+$ ,  $CO_2^+$ , и  $Fe^+$  [18, 106]. Структурированный пик при  $14 \leq m_i/q \leq 20$  наиболее вероятно происходит из родительских молекул  $H_2O$  и состоит в основном из ионов  $O^+$ ,  $OH^+$ ,  $H_2O^+$ ,  $H_3O^+$ . Пик при  $24 \leq m_i/q \leq 34$  может быть сформирован родительскими молекулами  $CO/CO_2$  или молекулам, содержащим N или S, и состоять из таких ионов как  $CO^+$ ,  $N_2^+$ ,  $H_2CO^+$ ,  $HCO^+$ ,  $CN^+$ ,  $O_2^+$ , или атомных ионов, таких как  $Mg^+$ ,  $Al^+$ ,  $Si^+$ ,  $P^+$ ,  $S^+$ . Несколько меньших пиков при  $m_i/q \approx 2, 8, 70$  и  $85$  могут быть образованы ионами  $H_2^+$ ,  $O^{++}$ , некоторыми тяжелыми органическими молекулами или ионно-водными кластерами.

Достаточно неожиданным явилось наблюдение в плазменном эксперименте на Вега 2 отчетливо выраженного пика на

спектрах АК-анализатора при  $m_i/q \approx 56$ . Этот пик также наблюдался в данных экспериментов IMS [43, 46] и NMS [156] на КА Giotto. Представляется весьма естественным отождествить его с присутствием ионов Fe<sup>+</sup> в самой внутренней части области кометной плазмы, хотя и следует отметить, что при энергетическом разрешении АК-анализатора  $\approx 5,5\%$  погрешность оценки массы таких ионов составляет около 3 а. е. м. Ранее о существовании заметного количества ионов Fe<sup>+</sup> в окрестности кометы Галлея известно не было. В спектрах других комет ионы металлов (как правило более легких) регистрировались только на очень малых гелиоцентрических расстояниях по сравнению с  $\approx 0,9$  а. е., где были проведены измерения на Вега 2 [164].

Большая часть масс-спектрограмм частиц кометной пыли также свидетельствует о присутствии в ней атомов железа [146, 147] и можно предположить, что такие пылинки являются одним из источников поступления металлических ионов к кому [131], хотя возможны и другие объяснения [83].

Особо следует обсудить результаты измерений в области кометной плазмы с помощью датчика PICCA в эксперименте RPA на КА Giotto. На ионных энергетических спектрах, полученных с помощью этого датчика, пик в окрестности  $m_i/q = 56$  обнаружен не был. На рис. 18 показаны результаты усреднения пяти последовательных спектров, измеренных на протяжении 16 с в диапазоне кометоцентрических расстояний  $(1,1-1,2) \cdot 10^4$  км [124]. Авторы этих измерений сначала связа-

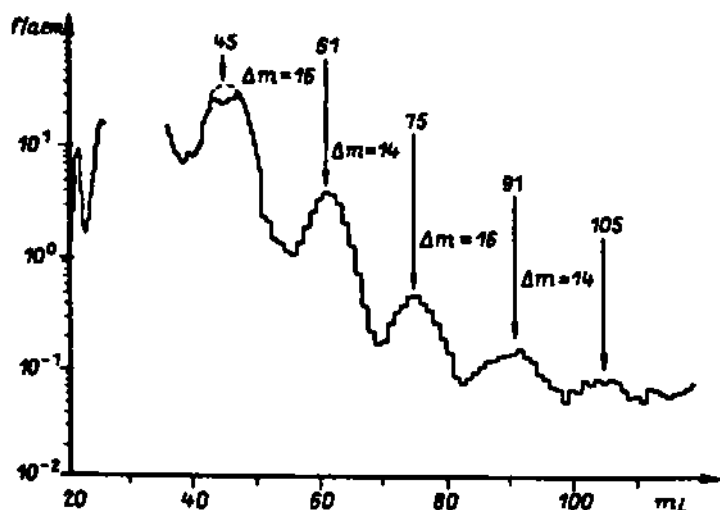


Рис. 18. Спектры кометных ионов, измеренные анализатором PICCA эксперимента RPA в области кометной плазмы на КА Giotto ( $r \approx (1,1-1,2) \cdot 10^4$  км)

ли наличие первых трех из приведенных на рис. 18 пиков с присутствием таких ионов как  $CS^+$ ,  $S_2^+$ ,  $CS_2^+$  [152, 153]. Впоследствии ими была предложена другая интерпретация данных, объясняющая наблюдавшуюся систему пиков присутствием в околокометном пространстве полимеризованного формальдегида  $(CH_2O)_n$  [124, 125, 167]. Последовательная диссоциация C—O связей такой молекулы приведет к наблюдающейся периодичности (см. рис. 18) пиков на энергетических спектрах.

Однако, так же как и в случае интерпретации данных других плазменных экспериментов, необходим более тщательный анализ совокупности имеющихся спектров, основывающийся на моделировании химических процессов, для их окончательной идентификации [46].

Представление о кометоцентрической зависимости концентрации тяжелых ионов в области кометной плазмы можно получить просуммировав потоки ионов как в отдельных, приведенных в верхней части рис. 17, интервалах  $E_i/q$ , так и оценив общий поток кометных ионов с  $0,3 \text{ кэВ} < E_i/q < 3 \text{ кэВ}$ . Для покоящихся относительно кометы, холодных ионов эта величина пропорциональна их концентрации  $n_i$ . На рис. 19 [19, 108, 110] соответствующие зависимости показаны по данным АК-анализатора эксперимента ПЛАЗМАГ-1 на КА Вега-2. С удалением от кометы условия применимости такого способа оценки  $n_i$ , вообще говоря нарушаются. Поэтому при больших  $r$  приведенные на рис. 19 данные (пунктирные ломаные) с меньшей степенью достоверности можно интерпретировать как кометоцентрические профили концентрации ионов [19, 108].

В равной степени, на расстояниях свыше нескольких десятков тысяч километров от ядра нельзя рассматривать как достоверные приведенные в работах [6, 247, 266] результаты оценок  $n_i$  по показаниям датчика БД-3 на КА Вега 1, 2. Действительно, наблюдавшийся в окрестности кометопазузы ( $r \approx 1,6 \cdot 10^5 \text{ км}$ ) быстрый рост показаний этого не очень широкоугольного ( $\approx 20^\circ - 30^\circ$ ), ориентированного по  $\vec{V}_{КА}$  датчика, по-видимому, связан с падением переносной скорости потока обтекающей комету плазмы. В окрестности этой границы перпендикулярная  $\vec{V}_{КА}$  компонента переносной скорости ионов  $\vec{V}_i$  сопоставима с  $V_{КА}$  (см. рис. 15) и основная часть потока тяжелых ионов находится вне поля зрения датчика БД-3. Торможение потока плазмы в результате увеличения эффективности перезарядки протонов солнечного ветра на кометопазузе приведет к более эффективному сбору кометных ионов и к росту показаний этого датчика не обязательно связанному с ростом концентрации ионов. Аналогичным образом, по-видимому, может быть объяснен и рост показаний БД-3 наблюдавшийся на  $r \approx (5-6) \cdot 10^4 \text{ км}$  [6, 247, 266]. На этих расстояниях по данным эксперимента PICCA/RPA также происходит падение скорости и температуры

ионов (рис. 16). Обе причины способствуют росту токов, регистрируемых датчиком БД-3, не связанному с ростом концентрации тяжелых ионов.

Приведенные на рис. 19 результаты оценки относительного содержания различных групп ионов в кометной плазме по данным АК-анализатора эксперимента ПЛАЗМАГ-1 в достаточной мере репрезентативны на расстояниях не превышающих несколько десятков тысяч км от ядра. Дальше от ядра в области кометной плазмы предложения, использованные при этих оценках, не применимы и аналогичные оценки могут быть получены только по данным масс-спектрометрических экспериментов. На рис. 20 приведена кометоцентрическая зависимость скоростей счета  $f$  датчиком HIS ионного масс-спектрометра IMS на КА Giotto ионов с массовыми числами 16, 17, 18, 19 и в группе массовых чисел 32—34 [43, 46]. Характерной чертой массового состава ионов в области кометной плазмы при  $r \geq 2 \cdot 10^4$  км является преобладание ионов, образованных из молекул воды и продуктов ее диссоциации ( $O^+$ ,  $OH^+$ ,  $H_2O^+$ ). Ближе к ядру преобладающим становится ион гидроксония  $H_3O^+$ , что свидетельствует о существенной роли ионно-молекулярных реакций в этой области [46]. Как по данным эксперимента IMS, так и по данным эксперимента ПЛАЗМАГ-1 концентрация ионов в области кометной плазмы с удалением от кометы уменьшается несколько быстрее, чем  $r^{-2}$  (последняя зависимость показана штрих-пунктирной прямой в верхней части рис. 19).

Достаточно очевидно, что близкая к  $r^{-2}$  зависимость  $n_i(r)$  определяется тем, что локальная скорость образования кометных ионов  $Q_i$  пропорциональна  $n_n$ , которая в свою очередь также спадает как  $r^{-2}$  [18, 106, 156]. Несколько более быстрый, чем  $r^{-2}$  спад  $n_i$  по-видимому связан с тем, что скорость потерь ионов  $L_i$  возрастает с увеличением  $r$  вследствие увеличения конвективного выноса ионов [19, 108, 110]. Такие представления о процессах, определяющих  $n_n$  на расстояниях  $r \geq 2 \cdot 10^4$  км от ядра кажутся вполне определенными. Действительно, по данным датчика КЦФ эксперимента ПЛАЗМАГ-1 на Вега-2 на  $r \approx 2 \cdot 10^4$  км  $n_n \approx 1,5 \cdot 10^5$  см $^{-3}$  [27, 199]. При характерном времени ионизации  $\tau_i \approx 10^8$  с локальная скорость ионообразования составляет  $Q_i \approx n_n/\tau_i \approx 0,15$  см $^{-3}$ с $^{-1}$ . Для того, чтобы на таких расстояниях при  $Q_i \approx L_i$  обеспечить  $n_i \approx 10^3$  см $^{-3}$  (см. рис. 19) достаточно, чтобы скорость конвективного выноса ионов была  $V_i \approx rQ_i/n_i \approx 3$  км/с [19, 110], что находится в разумном согласии с результатами измерения  $V_i$  на КА Giotto (см. напр. рис. 16).

Существование области магнитного барьера с застойной кометной плазмой (рис. 20) предсказывалось теоретически [129, 73], однако наблюдавшееся внутри застойной области падение концентрации ионов (строго говоря скорости счета) явилось неожиданностью (рис. 19). В [134, 135] обсуждались возможные

причины этого явления и наиболее вероятной признано падение температуры электронов  $T_e$  на  $r \approx 10^4$  км с  $\approx (1-3) \cdot 10^4$  К до 300 К, приводящее к быстрой рекомбинации в плазме. С учетом реакции диссоциативного прилипания электронов к молекулам воды, падение  $T_e$  находит свое физическое объяснение [14]. К сожалению, особенности работы EESA и АЕ электронных анализаторов на КА Giotto и Vega 1, 2, соответственно, не позволили получить необходимое экспериментальное подтверждение.

Возможность связать наблюдавшееся в окрестности  $r \approx$

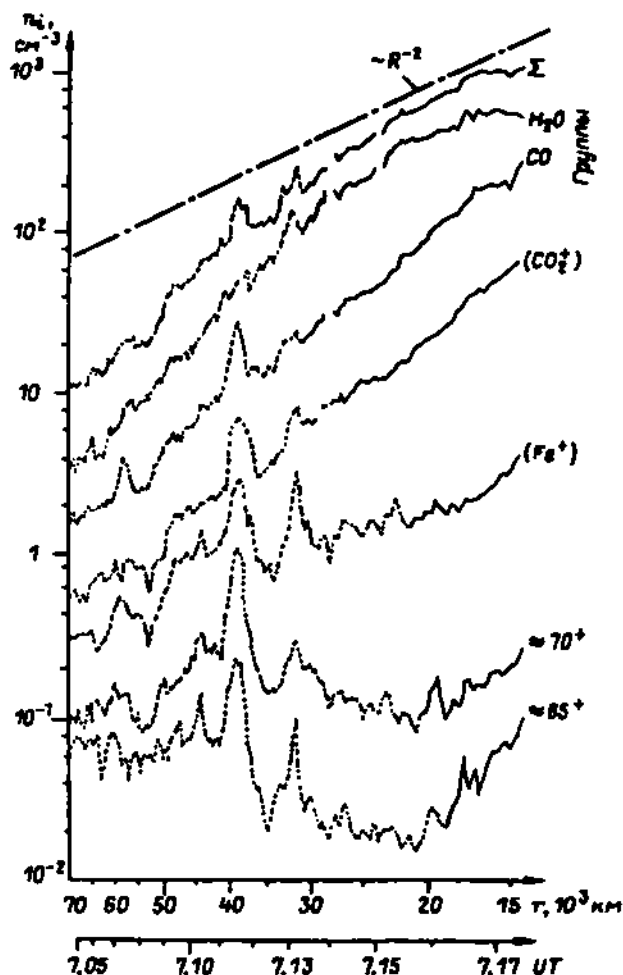


Рис. 19. Кометоцентрическая зависимость концентрации отдельных групп ионов (см. рис. 17), оцененная по результатам измерений ионных спектров в области кометной плазмы на КА Vega 2

$\approx 10^4$  км падение  $n_i$  с нестационарностью солнечного ветра была отклонена в [134, 135] на основании того, что по данным цилиндра Фарадея БД-3 на Вега 1 также было зарегистрировано аналогичное событие [6, 247, 266]. Однако, во время прилета Веги 1 в окрестности кометы Галлея через область кометной плазмы проходила секторная граница межпланетного магнитного поля [230]. Ускорение кометной плазмы, связанное с этим нестационарным явлением (экспериментальные свидетельства в его пользу будут обсуждены в последней части обзора), могло привести к уходу потока кометной плазмы из поля зрения датчика БД-3, что так же, как и падение  $n_i$ , приводит к уменьшению показаний этого прибора.

Систематическое торможение и рост концентрации ионов в области кометной плазмы не являются монотонными. Например, на КА Вега-2 на  $r \approx 4 \cdot 10^4$  км и  $r \approx 3 \cdot 10^4$  км в так называемых «горячих пятнах» (рис. 19) наблюдался быстрый рост  $n_i$ , сопровождающийся последующим спадом [107]. В этих образованиях наблюдался также всплеск интенсивности плазменных волн на нижней гибридной частоте; для их объяснения в [77] привлекались представления о критической ионизационной скорости Альвена. По-видимому, аналогичное событие, детально проанализированное в [132, 134], наблюдалось на  $r \approx 4 \cdot 10^4$  км по данным IMS/HIS спектрометра на КА «Giotto» (рис. 20). В этих же работах сообщается о тенденции к уменьшению скорости ионов во время роста  $n_i$ , однако по данным HIS оценивалась только параллельная  $V_{КА}$  компонента их скорости.

Другим проявлением немонотонности изменения характеристик плазмы в области кометных ионов является присутствие в ней специфической квазипериодической модуляции интенсивности потока ионов [18, 106]. В качестве примера такой модуляции на рис. 21 приведены спектрограммы, построенные по данным измерений с помощью АК-анализатора эксперимента ПЛАЗМАГ-1 на расстояниях  $r \approx 8 \cdot 10^4$  км (а)  $r \approx 5 \cdot 10^4$  км (б) от ядра, соответственно. Значения  $f_0$  и  $df$  для приведенных на этом рисунке спектрограмм равны, соответственно,  $4 \cdot 10^3$  и  $4 \cdot 10^2$  с<sup>-1</sup> (рис. 21а), и  $10^4$  и  $10^3$  с (рис. 21б). Характерная амплитуда модуляции потоков ионов группы воды ( $E_i/q \sim 600$  эВ) составляет  $(f_{max} - f_{min}) / (f_{max} + f_{min}) \sim 0,05 - 0,1$ . Обращает на себя внимание уменьшение «периода» модуляции при приближении к комете с  $T \approx 10$  с при  $r \approx 8 \cdot 10^4$  км до  $T \approx 8$  с при  $r \approx 5 \cdot 10^4$  км [19, 108, 110].

Наблюдаемую квазипериодическую модуляцию потока тяжелых кометных ионов можно было бы объяснить либо сильной нестационарностью ионизации нейтрального газа, либо развитием неустойчивости анизотропного по своей природе распределения кометных ионов по скоростям [19, 106]. Первый эффект

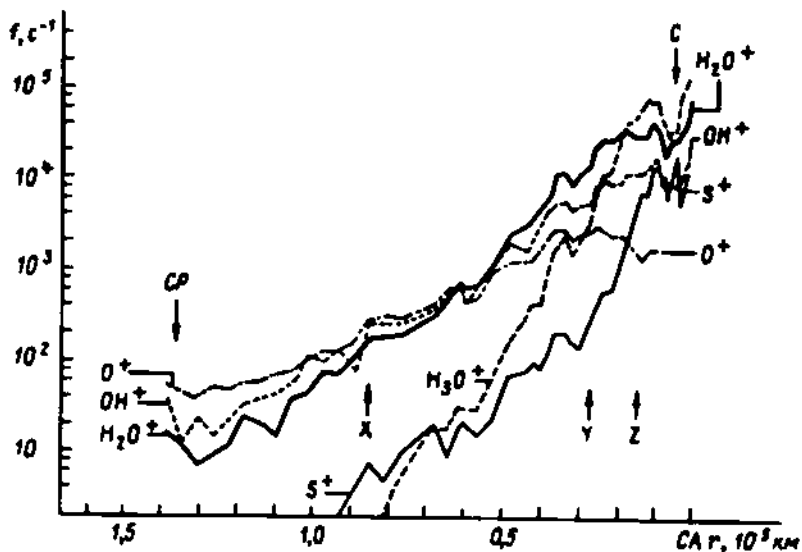


Рис. 20. Радиальные профили скоростей счета основных кометных ионов масс-спектрометром HIS эксперимента IMS на КА Giotto в области кометной плазмы

мог бы возникнуть, если в результате очень быстрой ионизации нейтрального газа (за время меньшее или сравнимое с гиропериодом ионов) образовался сгусток ионов, сбундрованный по фазе циклотронного вращения. Однако, характерный период флуктуаций потока плазмы в несколько раз меньше циклотронного периода доминирующих в плазме ионов группы воды.

Поэтому, более вероятно, что наблюдаемая модуляция связана с генерацией МГД-волн, подобно тому, как это происходит в солнечном ветре перед околокометной ударной волной [19, 110]. Эта неустойчивость связана с циклотронным резонансом ионов с альвеновскими колебаниями и, поэтому, длина волны возбуждаемых колебаний может быть оценена как  $\lambda \approx V_1 / \omega_{ci}$  ( $\omega_{ci}$  — циклотронная частота ионов,  $V_1$  — их скорость вдоль магнитного поля). При  $B \approx 50 \gamma$  и пространственном масштабе флуктуаций потока в плазме  $\lambda \approx V_{KA} \cdot T \approx 700$  км получаем оценку продольной скорости  $V_1 \approx 30$  км/с, [19, 108], что разумным образом согласуется с оценкой переносной скорости кометных ионов у кометоплаузы по данным АК- и АС-анализаторов на КА Vega-2 (см. рис. 15). Наблюдавшееся уменьшение периода модуляции с  $T \approx 10$  с до  $T \approx 8$  с можно связать с зарегистрированным на Vega-2 увеличением магнитного поля с  $B \approx 40 \gamma$  до  $B \approx 50 \gamma$  [28, 207].

Полный физический анализ результатов плазменных наблюдений в области кометной плазмы в настоящее время не завер-

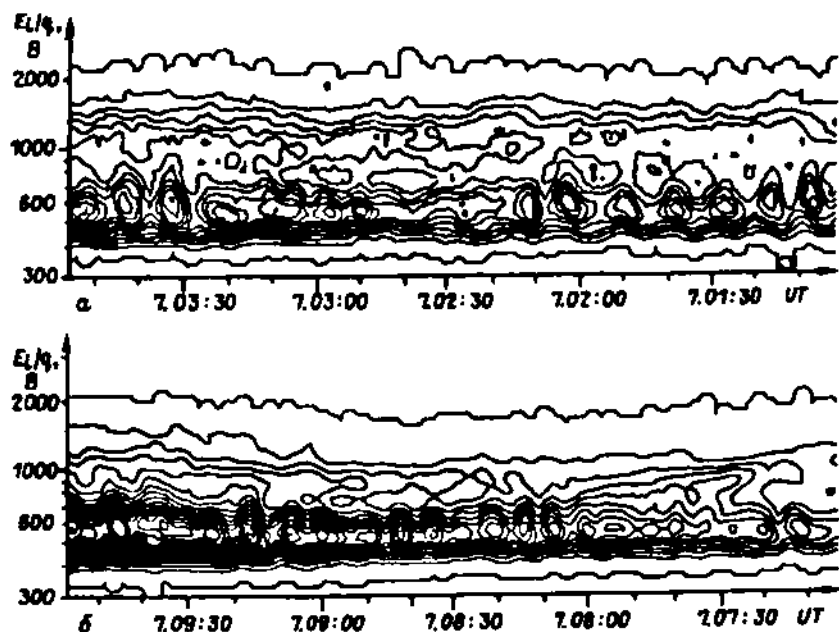


Рис. 21. Спектрограммы ионных потоков в области кометной плазмы, измененные АК анализатором эксперимента ПЛАЗМАГ-1 на КА Вега 2 в области кометной плазмы в диапазонах кометоцентрических расстояний  $(75-88) \cdot 10^4$  км (а) и  $(48-60) \cdot 10^4$  км (б)

шен и далеко не все происходящие в ней процессы упомянуты в этом обзоре. В качестве дополнительных границ, подразделяющих область кометной плазмы на части с преобладанием тех или иных физических процессов в работе [46] выделены например границы X, Y, Z. Положение этих границ отмечено стрелками на рис. 16, 20, 24. На границе X вследствие перезарядки происходила постепенная потеря энергичных ионов солнечного ветра [137] и наблюдалось второе резкое уменьшение концентрации протонов [86, 87]. Граница Y характеризуется резким уменьшением температуры ионов [123, 156, 229] и, наконец граница Z ограничивает уже упоминавшуюся выше застойную область [43, 229].

## 6. КОНТАКТНАЯ ПОВЕРХНОСТЬ И ИОНОСФЕРА

Вся область кометной плазмы заполнена магнитным полем, принесенным из солнечного ветра плазменным потоком (рис. 11). Величина этого поля возрастает по мере торможения потока, достигая наибольших значений в застойной части области кометной плазмы, называемой также магнитным барьером. Бли-



же к ядру по данным магнитометрического эксперимента MAG на КА Giotto обнаружена полость свободная от присутствия магнитного поля [177]. Результаты измерения магнитного поля при входе этого КА в магнитную полость и выходе из нее показаны ломаной 4 на рис. 22 [262]. Граница полости — контактная поверхность С, отделяющая замагниченную область кометной плазмы от собственно кометной ионосферы, свободной от магнитного поля, наблюдалась, соответственно, на  $r = 4700$  км и  $r = 3900$  км [179, 180].

В ряде работ эту же границу называют «ионопаузой» или «тангенциальным разрывом». Эти термины нам представляются менее удобными. Действительно, ионопаузой принято называть границу, отделяющую ионосферу (напр. Венеры) от магнитного барьера, на которой выполняется условие баланса давлений ионосферной плазмы и поля в магнитном барьере. На тангенциальном МГД-разрыве также должно выполняться это условие. Однако на поверхности С условие баланса давлений не выполняется, в ее образовании существенную роль играет сила трения между ионами и протекающим через нее, радиально расширяющимся нейтральным газом (см. ниже).

Как видно из представленных на рис. 22 данных, контактная поверхность характеризуется весьма резким падением магнитного поля — его величина уменьшается с  $\approx 20\gamma$  до  $\approx 0\gamma$  на расстоянии  $\approx 25$  км [181]. На этом разрыве происходит также значительное, на  $\approx 1000$  К уменьшение температуры ионов. На рис. 236 и рис. 246 приведены результаты измерений  $T_i$  в окрестности С по данным Е-анализатора эксперимента NMS и датчика HIS эксперимента IMS, соответственно [160, 229]. Характерная величина  $T_i$  в исследованной части кометной

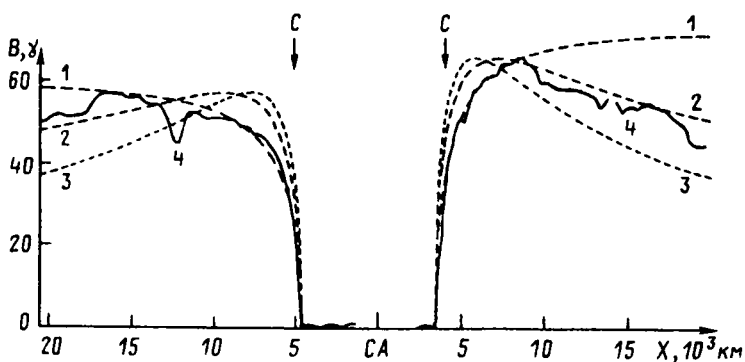


Рис. 22. Результаты измерения магнитного поля в эксперименте MAG (4) при пересечении КА Giotto контактной поверхности (С) на входе его в магнитную полость и выходе из нее. Кривые (1—3) — расчетные профили  $B(r)$  [262]

ионосферы составляла  $\approx 200$  К — наименьшие значения когда либо измерявшиеся прямыми методами [160]. Сплошной ломаной на рис. 23б показаны также результаты оценки температуры кометного нейтрального газа  $T_n$  по данным NMS [160]. Ионизация нейтрального газа электронами внутри этого масс-спектрометра приводит к расширению энергетического спектра образующихся ионов и приведенные на рис. 23б значения  $T_n$

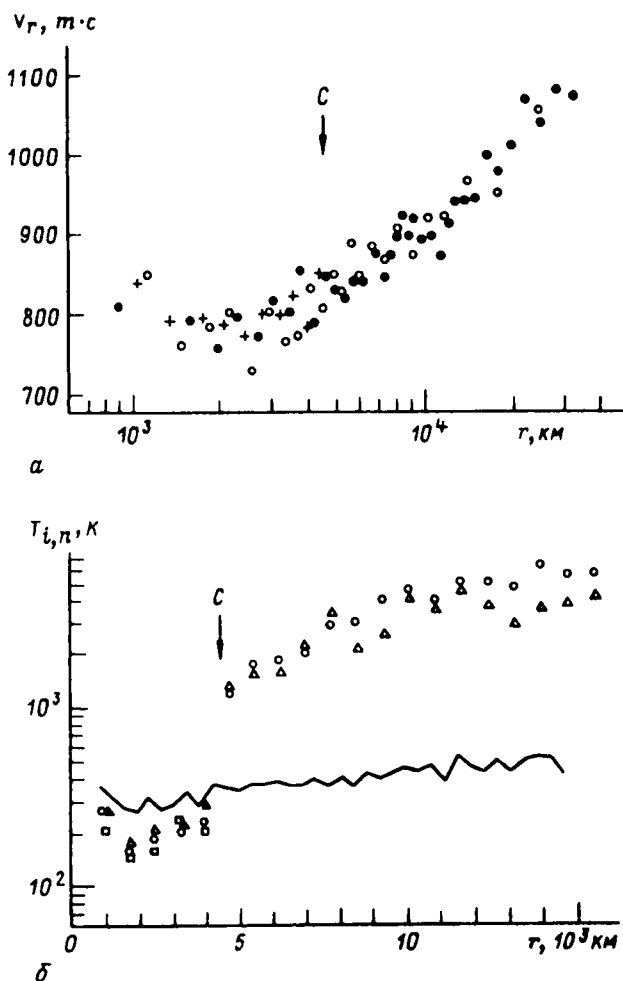


Рис. 23. (а) — результаты измерения радиальной компоненты скорости ионов (+) и молекул воды (O — ионизация электронами с энергией 17 эВ, ● — с энергией 90 эВ); (б) — температура ионов с массовыми числами 12—19 ( $\Delta$ ), 26—35 (O) и 39—50 ( $\square$ ), и верхний предел температуры нейтрального газа (ломаная) по данным E анализатора эксперимента NMS на КА Giotto

завышены по крайней мере на  $\approx 100$  К [160]. В отличие от  $T_i$ , температура нейтрального газа существенных изменений на контактной поверхности не испытывает.

Не испытывает существенных изменений на контактной поверхности и скорость нейтрального газа (рис. 23 а). На этом же рисунке крестиками показаны значения радиальной компоненты скорости ионов в ионосфере по данным NMS [160]. Как можно видеть из представленных на рис. 23 а данных, в этой части околокометного пространства скорости расширения нейтрального газа и ионов близки. Однако, в отличие от скорости нейтрального газа, на контактной поверхности скорость ионов испытывает скачок. Качественно этот скачок в окрестности С можно видеть в приведенных на рис. 24 а результатах измерения радиальной компоненты скорости ионов датчиком HIS в эксперименте IMS [229]. К сожалению, значения остальных компонент этой векторной величины по имеющимся данным получены быть не могут.

О кометоцентрической зависимости  $n_i$  в кометной ионосфере можно судить по опубликованной в [43] зависимости от  $r$  скорости счета датчика HIS эксперимента IMS. Эта величина с уменьшением  $r$  увеличивается как  $\sim r^{-1}$ , что согласуется с зависимостью, предсказанной для  $n_i$  сферически симметричными моделями фотохимического равновесия, в которых фотоионизация кометных нейтралов балансируется диссоциативной рекомбинацией [43]. Более детальный анализ возможно обнаружит

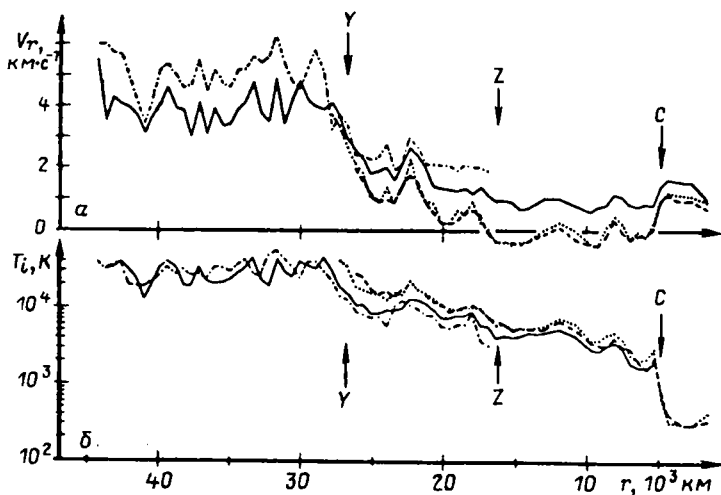


Рис. 24. Кометоцентрические профили радиальной компоненты скорости (а) и температуры (б) ионов с массовыми числами 16 (---), 17 (—), 18 (.....) и 19 (— · —), оцененные по показаниям датчика HIS эксперимента NMS на КА Giotto

более сложную картину. К настоящему времени известно, что не только ядро, но и пылевые потоки следует считать источниками нейтрального газа [62].

Преобладающим ионом в ионосфере кометы Галлея является ион гидроксония  $\text{H}_3\text{O}^+$ . На рис. 25 для сравнения приведены два  $m_i/q$  спектра, измеренные датчиком HIS эксперимента NMS на КА Giotto по обе стороны от контактной поверхности — снаружи ее, на  $r \approx 6000$  км (а) и в ионосфере, на  $r \approx 1500$  км (б) [43]. Наиболее характерными отличиями спектра (б) от (а) является [46]: четко выраженный пик  $m_i/q=19$  ( $\text{H}_3\text{O}^+$ ), свидетельствующий о возросшей роли ионно-молекулярных реакций в ионосфере по сравнению с застойной областью; большое разнообразие пиков в диапазоне  $24 \leq m_i/q \leq 34$  возможно содержащих  $\text{HCN}^+$ ,  $\text{CO}^+$ ,  $\text{N}_2^+$ ,  $\text{H}_2\text{CO}^+$ ,  $\text{S}^+$ ,  $\text{H}_2\text{S}^+$  и  $\text{C}_2\text{H}_n^+$  — углеводороды; несколько пиков в окрестности  $m_i/q=44$  ( $\text{CO}_2^+$ ) вероятно созданных ионами  $\text{CS}^+$  (44),  $\text{HCS}^+$  и  $\text{HCO}^+$  (45) и  $\text{CH}_2\text{SH}^+$  (47) [156]; присутствие ионов железа  $m_i/q=56$ . Следует отметить, что пик с  $m_i/q=56$  по данным АК-анализатора эксперимента ПЛАЗМАГ-1 на КА Вега 2 наблюдался также и в застойной части области кометной плазмы. Наконец, на спектрах анализатора PICCA эксперимента RPA, полученных на КА Giotto в кометной ионосфере ( $r \approx 4 \cdot 10^3$  км), обнаружен отчетливый пик с  $m_i/q=39$ . Авторы этого эксперимента полагают, что этот пик создан катионом ароматического углеводорода циклопропенил  $\text{C}_3\text{H}_3^+$  [154].

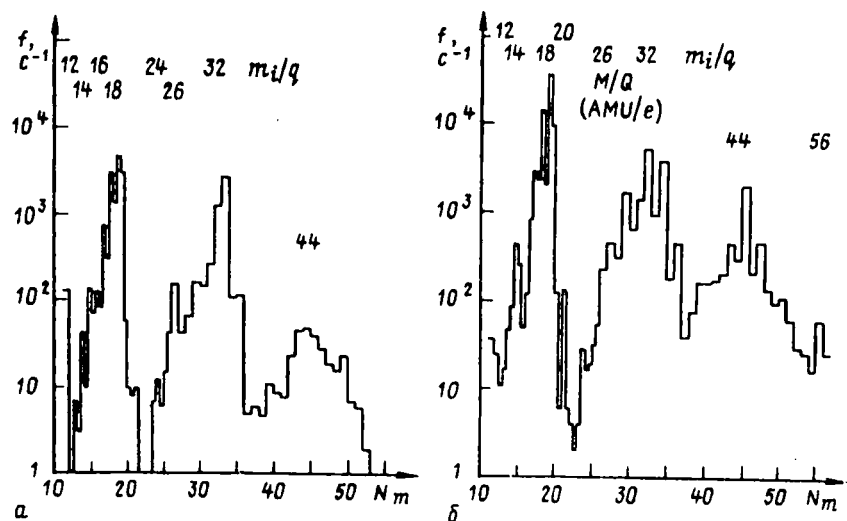


Рис. 25. Массовые спектры ионов, измеренные датчиком HIS эксперимента: IMS на КА Giotto в области кометной плазмы (а) и в кометной ионосфере (б)

Остановимся теперь на физических процессах, определяющих положение и формирование контактной поверхности. Величина магнитного поля в застойной области (магнитный барьер) легко оценивается из условия равенства его давления и динамического давления солнечного ветра:

$$\frac{B^2}{8\pi} \approx \rho V^2 \approx 1,3 \cdot 10^{-8} \text{ дн/см}^2. \quad (8)$$

При  $V = 345 \text{ км/с}$  и  $\rho/m_p \approx 6,4 \text{ см}^{-3}$ , характерных для условий в солнечном ветре во время пролета Giotto [53], из соотношения (8) следует  $B \approx 60 \gamma$  (см. также рис. 22). В то же время давление ионосферной плазмы при  $V_i \approx 0,8 \text{ км/с}$  (рис. 23 а) и  $\rho_i/m_p \approx 2 \cdot 10^8 \text{ см}^{-3}$  весьма мало и составляет  $4 \cdot 10^{-10} \text{ дн/см}^2$ . Однако, в области, где напряженность магнитного поля максимальна ( $dB/dr = 0$ ), поток радиально расширяющегося нейтрального газа передает значительный импульс плазме с помощью трения, воздействуя на каждый элемент ее объема с силой  $k_{in} n_n \rho_i V_n$ , где  $k_{in} \approx 2 \cdot 10^{-9} \text{ см}^3 \text{с}^{-1}$  — характерная скорость реакции ион- $\text{H}_2\text{O}$ . В случае, когда это воздействие компенсируется натяжением искривленных силовых линий в области магнитного барьера, их радиус кривизны  $r_c$  можно оценить из условия:

$$\frac{B^2}{4\pi r_c} \approx k_{in} n_n \rho_i V_n. \quad (9)$$

Подставив в (9) выражение (1) с очевидной заменой  $n_0 r_0^2 = Q_0/4\pi V_n$  и приняв в нем  $r = r_c$  из (9) получим:

$$r_c \approx \frac{k_{in} Q_0 \rho_i}{B^2} \quad (10)$$

Выражение (10) впервые было получено в работе [129]. Используя (9), характерное расстояние до магнитного барьера в подсолнечной точке может быть оценено как  $r_c = 5 \cdot 10^3 \text{ км}$ , что вполне соответствует результатам магнитных измерений [179, 180].

После того, как в результате магнитных измерений на Giotto было обнаружено резкое падение магнитного поля на контактной поверхности, в уравнение (9) в работах [54, 133] был добавлен еще один член, учитывающий градиент давления магнитного поля:

$$\frac{1}{4\pi} B \frac{dB}{dr} + \frac{1}{4\pi} \frac{B^2}{r} = k_{in} n_n \rho_i V_n. \quad (11)$$

При  $\rho_i \sim r^{-1}$  это уравнение имеет достаточно простое решение:

$$B(r) = B_m \frac{r_m}{r} \sqrt{1 + 2 \ln(r/r_m)}, \quad (12)$$

где  $r_m \sim Q_0^{3/4}$  — радиальное расстояние до максимума магнитного поля в магнитном барьере. В соответствии с (12) магнитное поле стремится к нулю при  $r = r_m \cdot \exp(-1/2) \approx 0,6 r_m$ .

Упомянутые выше уравнения были обобщены на двумерную конфигурацию в работе [262] и привели ее автора к выводу, что магнитная полость имеет форму «слезинки». Это вполне согласуется с результатами МГД-расчетов [226]. Кометоцентрические профили  $B(r)$ , рассчитанные в работе [262] на рис. 22 показаны плавными кривыми 1—3. Наконец, в работах [64, 117] были рассчитаны  $B(r)$  профили вне контактной поверхности с учетом градиента давления плазмы и фотоионизации, несколько лучше описывающие наблюдавшееся распределение  $B(r)$ . С использованием закона подобия  $r_m \sim Q_0^{3/4}$  и рассчитанной в [262] формы магнитной полости, в [135] было показано, что пролетающий через хвост кометы Джакобини-Циннера КА ICE не должен был входить в магнитную полость.

## 7. НЕСТАЦИОНАРНЫЕ ПРОЦЕССЫ В ОБЛАСТИ КОМЕТНОЙ ПЛАЗМЫ

Проведенный выше обзор результатов плазменных наблюдений в кометных проектах в основном касался процессов, происходящих в околокометном пространстве в квазистационарных условиях — при постоянных во времени скорости производства газа ядром кометы и характеристиках солнечного ветра, хотя обсуждалась и возможная связь некоторых из зарегистрированных явлений с изменчивостью солнечного ветра и  $Q_0$ . В этой части работы будут рассмотрены некоторые результаты плазменных измерений в околокометном пространстве, относящиеся к наблюдению заведомо нестационарных процессов в области кометной плазмы.

Общей чертой плазменных измерений на КА Вега 1,2 в области кометной плазмы являлось отсутствие регистрации АС анализатором эксперимента ПЛАЗМАГ-1 каких-либо ионов, приходящих в направлении от Солнца. Однако, в окрестности наибольшего приближения Веги 1 к ядру (СА) этот анализатор отметил кратковременный, продолжавшийся 5 минут всплеск потока ионов с энергиями  $E_i/q \approx 100-1000$  эВ (рис. 10 а). Одновременно также ориентированный на Солнце цилиндр Фарадея СЦФ отметил всплеск потока ионов с характерной величиной  $F \approx (5-8) \cdot 10^9$  см<sup>-2</sup>с<sup>-1</sup>. На основании сравнительно короткой продолжительности и асимметричного положения наблюдавшегося события относительно СА в работах [9, 250] было выдвинуто предположение, что оно связано с нестационарным процессом ускорения заряженных частиц при прохождении секторной границы межпланетного магнитного поля через область кометной плазмы.

На рис. 26 а стрелками показаны результаты измерения магнитного поля магнитометром МИША вдоль траектории КА Вега 1 [28, 207]. В целом магнитное поле как бы обвалакивало комету и было направлено от Солнца при подлете и к Солнцу отлете от кометного ядра. Однако, между 7.11 и 7.24 UT на-

правление магнитного поля было совершенно противоположно. Следует отметить, что несколькими часами раньше  $B_z$  компонента ММП также изменяла свой знак. Поэтому в [230] было предположено, что часть магнитного поля, наблюдаемая в окрестности точки наибольшего приближения Веги 1 является остатком ММП предыдущего направления, сносимого к ядру постепенно тормозящимся потоком плазмы и, поэтому, подошедшим к ядру с задержкой по времени. Выполненное впоследствии трехмерное МГД-моделирование обтекания солнечным ветром кометы [231, 232] подтвердило это предположение.

Взаимодействие в плазме магнитных полей противоположной полярности приводит к картине пересоединения с X-точкой. Этот тип топологии магнитного поля показан на рис. 26 а [9, 250]. Область, где датчики АС- и СЦФ-эксперимента ПЛАЗМАГ-1 регистрировали всплеск потока ионов отмечена на этом рисунке точками.

Как видно из приведенных на рис. 26 а данных, всплеск потока ионов наблюдался в окрестности поверхности, разделяющей области с противоположно направленными магнитными полями (пунктирная линия). Можно предположить, что эти ионы были ускорены в процессе пересоединения магнитных полей и покидают область пересоединения (окрестность X-точки) с некоторой скоростью  $\vec{V}_i$  направленной вдоль разделяющей поверхности. На рис. 27 а в связанном с КА пространстве скоростей показаны поля зрения датчиков эксперимента ПЛАЗМАГ-1 и вектор скорости  $\vec{V}_{КА}$  ионов, покоящихся относительно ядра кометы. Возможная векторная диаграмма условий этого эксперимента в окрестности наибольшего приближения Веги 1 к ядру показана на рис. 27 б [9, 250]. Величина  $V_i$  на этой диаграмме выбрана такой, чтобы вектор скорости ионов относительно КА  $\vec{V} = \vec{V}_i + \vec{V}_{КА}$  попадал в поле зрения датчиков АС и СЦФ. Нетрудно показать, что при любом направлении  $V_i$  ее величина должна превышать  $\approx 35$  км/с для выполнения последнего условия [9, 250].

С другой стороны, из измерений ионного состава [19, 43, 110] мы знаем, что среди кометных ионов преобладают ионы группы воды с  $m_i/m_p \approx 16-18$ . При скорости относительно Веги 1  $V \approx |\vec{V}_i + \vec{V}_{КА}| \geq 50$  км/с эти ионы будут наблюдаться АС-анализатором при энергиях  $E_i \geq 200$  эВ, что согласуется с представленными на рис. 10 а измерениями. Используя приведенную выше оценку по данным СЦФ общего потока ионов, приходящих в направлении от Солнца, мы можем оценить концентрацию ускоренных ионов  $n_i \approx F_i/V_i \approx (1-2) \cdot 10^3$  см. Эта величина вполне согласуется с концентрацией оцененной по данным КЦФ [9, 250].

Таким образом, на основе различных, но самосогласующих-

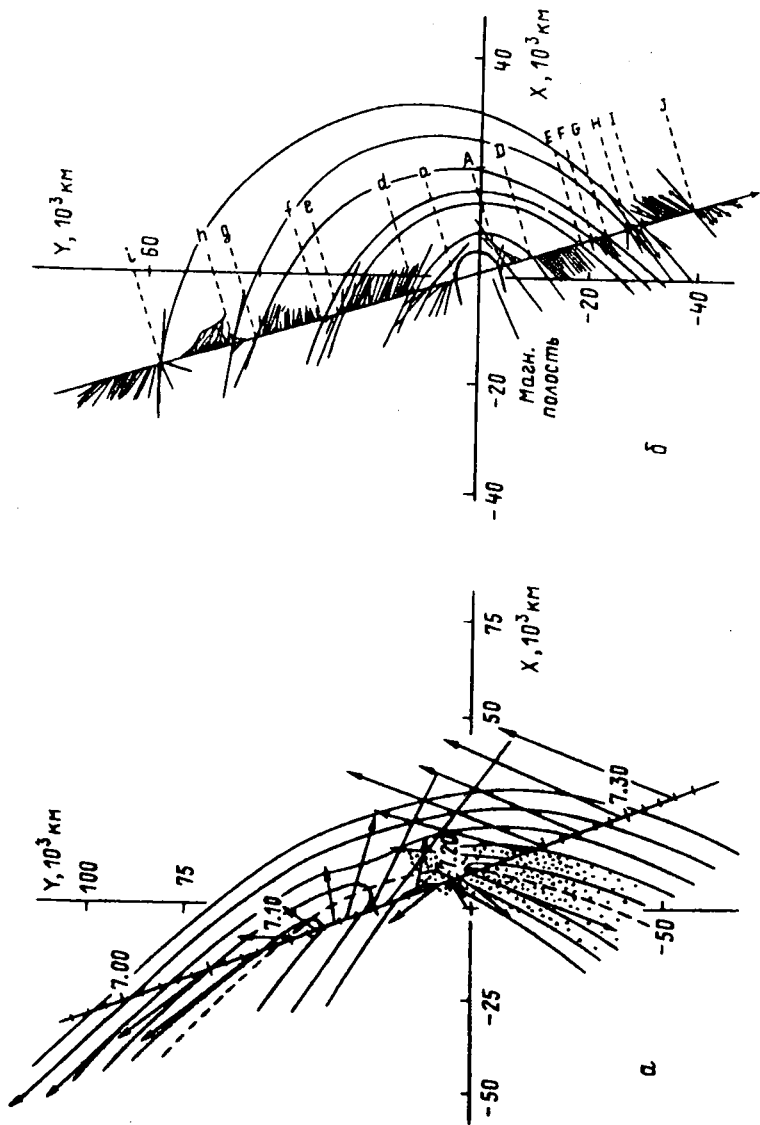


Рис. 26. Возможная геометрия магнитного поля во время пролета Верой 1 (а) и Giotto (б) области кометной плазмы. Точками на рис. 26а отмечена область, где по показаниям датчиком АС и СЦФ эксперимента ПЛАЗМАГ-1 наблюдался всплеск потока кометных ионов (рис. 10а)



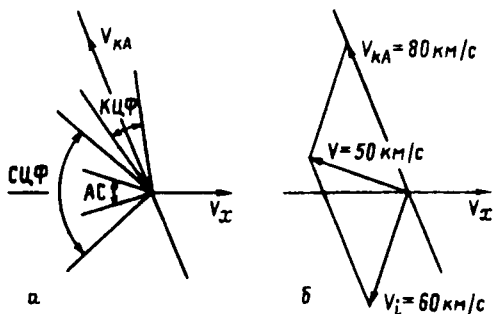


Рис. 27. Возможная векторная диаграмма условий эксперимента ПЛАЗМАГ-1 в окрестности наибольшего приближения Веги 2 к ядру

ся измерений в [9, 250] был сделан вывод, что всплеск потока кометных ионов, наблюдавшийся на Вега 1 в окрестности наибольшего ее приближения к ядру кометы Галлея (рис. 10 а), вызван направленным движением ионов группы воды, ускоренных до скорости в несколько десятков километров в секунду. Это ускорение могло быть вызвано пересоединением магнитных полей противоположной полярности, заторможенных кометной плазмой.

Альвеновская скорость в кометной плазме с  $B=60 \gamma$  [230] и оцененной выше плотностью тяжелых ионов составляет 7—10 км/с. Поэтому предложенная в [9, 250] интерпретация плазменных измерений предполагает спорадическое присутствие глубоко в области кометной плазмы суперальвеновских скоростей, в то время как обычно там скорость плазмы доальвеновская и по данным измерений на Giotto не превышает  $\approx 3$  км/с (рис. 16, 24).

Следует отметить также, что одновременно со всплеском потока тепловых ионов в направлении от Солнца, по данным телескопа ТЮНДЕ-М на Вега 1 наблюдался также всплеск потока энергичных ионов с энергией  $\geq 40$  кэВ и таким образом, прохождение секторной границы ММП через область кометной плазмы сопровождается ускорением заряженных частиц в широком диапазоне энергий [9, 250]. Не объясненной пока особенностью наблюдений с помощью КА Вега 1 является одновременное со всплеском кратковременное увеличение частоты бортовых передатчиков сантиметрового и дециметрового диапазонов [2].

Если во время пролета Веги 1 через область кометной плазмы проходила отдельная секторная граница ММП, то во время пролета Giotto в этой же области наблюдалась намного более сложная картина. На рис. 26 б приведены результаты измерений магнитного поля магнитометром MAG на этом КА [195, 196], где наблюдалось многократное изменение направлений

магнитного поля. Детальный анализ особенностей плазменных измерений на этом КА, связанных с прохождением многочисленных разрывов через область кометной плазмы еще не проведен.

На различие условий в области кометной плазмы во время пролета через нее различных КА может указывать и сравнение результатов измерения электронных спектров на КА Вега 2 и Giotto. На рис. 28 а показаны результаты измерений энергетических спектров электронов при помощи анализатора АЕ на КА Вега-2 в диапазоне кометоцентрических расстояний  $(1,5-2,5) \cdot 10^4$  км [20, 111]. При приближении этого КА к комете возрастали не только скорости счета АЕ в диапазоне энергий 0,3—3 кэВ, но изменялся и профиль их распределения до энергиям таким образом, что наибольшие скорости счета регистрировались АЕ при все больших энергиях. В то же время на КА Giotto значительных потоков электронов с такими энергиями в области кометной плазмы не наблюдалось [199].

Присутствие электронов с энергиями  $\approx 1$  кэВ во время пролета Веги 2 и их отсутствие во время пролета Giotto может быть обусловлено либо приборным эффектом, либо спорадическим характером появления этих частиц. Возможный приборный эффект обсуждался в [20, 109], попытки его объяснения не удалось. С другой стороны, имеются наблюдения, подтверждающие существование спорадических потоков электронов вблизи ядра кометы Галлея.

Электроны с энергией около 1 кэВ могут быть образованы в процессах типа суббурь в земной магнитосфере. Возможность таких процессов в окрестности комет рассматривались в [127, 128]. На рис. 28 б в соответствии с работами [129, 164] приве-

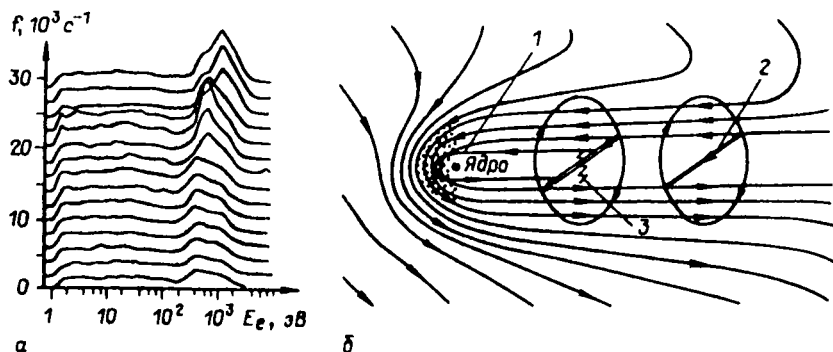


Рис. 28. Результаты измерений энергетических спектров электронов в области кометной плазмы  $r = (24,7-14,5) \cdot 10^4$  км АЕ анализатором эксперимента ПЛАЗМАГ-1 на КА Вега 2 (а) и схематическая модель процессов, приводящих к образованию энергичных электронов в околокометном пространстве (б)

дена схема развития «кометной суббури». В стационарном состоянии токовая система кометного хвоста имеет обычную  $\theta$ -образную форму. Если ток поперек хвоста частично разрывается, возникают направленные вдоль него токи, замыкающиеся через кому (рис. 28 б). Такой процесс может привести к ускорению электронов до энергий в несколько кэВ, как и в случае авроральных электронов в верхних слоях земной атмосферы. Возможно, на КА Vega 2 наблюдалась такая суббуря с генерацией энергичных электронов, в то время как при пролете КА Giotto такой суббури не было.

Свидетельством в пользу спорадического появления энергичных электронов в околокометном пространстве могут являться результаты измерения УФ-спектров кометы Галлея 18—19 марта 1986 г. на спутнике IUE [65]. За время 37 минут между двумя из приведенных в этой работе спектров интенсивность линии  $\text{CO}^+$  упала более чем в 4 раза, в то время как яркость OH осталась практически неизменной. Для объяснения этой особенности в [65] привлекается предположение о возможности дополнительной ионизации потоками энергичных электронов.

Наблюдения кометы Галлея в феврале 1986 г. с помощью специально запущенной ракеты обнаружила в УФ-диапазоне линию с  $\lambda = 1536 \text{ \AA}$ , отождествленную с кислородной эмиссией [259]. В отличие от других эмиссий эта интеркомбинационная линия не возбуждается солнечным излучением, что указывает на существование во внутренней коме области, где существенно возбуждение электронным ударом [259]. Рассмотрение процессов соударения с электронами помогает разрешить и «углеродную проблему» [260], связанную с присутствием неожиданно большого количества нейтрального и ионизированного углерода в окрестности кометы Галлея и других комет.

## 8. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Обзор результатов плазменных наблюдений в околокометном пространстве с борта КА Vega 1, 2, Suisei, Sakigake, Giotto и ICE, представленный в настоящей работе, хотя и дает представление о большом объеме принципиально новой научной информации, полученной в ходе выполнения этих проектов, не может претендовать на полноту. С целью частичной компенсации этого неизбежного недостатка, в прилагаемый к нему список литературы включены по возможности все публикации, содержащие информацию о результатах плазменных кометных экспериментов и некоторые из предшествующих (и последующих) публикаций, полезных для анализа этих результатов.

В целом, представления о взаимодействии солнечного вет-

ра с кометами, существовавшие до прямых измерений в околокометном пространстве и основанные на данных дистанционных наблюдений и их теоретическом анализе, подтвердились. В соответствии с теоретическими предсказаниями:

— замедление течения солнечного ветра в результате его нагружения кометными ионами начинается за несколько миллионов километров от ядра;

— на расстоянии  $r \approx 10^6$  км от него образуется фронт ударной волны, хотя ранее обсуждалась также и возможность его отсутствия;

— дополнительное нагружение солнечного ветра кометными ионами и связанный с этим рост давления и плотности плазмы приводит к очень низкой скорости течения в застойной области при  $r \approx 10^4$  км;

— вблизи ядра существует полость свободная от магнитного поля, заполненная кометной ионосферной плазмой.

Тем не менее прямые измерения позволили обнаружить ряд существенных явлений, не предсказанных ранее существовавшими моделями, например:

— оказалось, что даже на очень больших расстояниях от ядра захват образовавшихся в солнечном ветре ионов приводит к развитию неожиданно сильной МГД-турбулентности эффективно изотропизирующей и ускоряющей их до энергий  $\geq 10^2$  кэВ;

— нестационарный характер производства газа вращающимся кометным ядром прослеживается вплоть до  $\approx 10^7$  км от него;

— неравновесная функция распределения многокометной плазмы в кометошите содержит две ветви кометных ионов;

— обнаружено существование кометопаузы — сравнительно резкой, ранее не предсказанной границы. Эта граница не является обычным МГД-разрывом, а, по-видимому, связана с быстрой перестройкой (изотропизацией) функции распределения протонов в ее окрестности;

— показано, что увеличение концентрации тяжелых ионов в области кометной плазмы происходит не монотонно, а волнообразно, квазипериодически с «периодом», уменьшающимся по мере приближения к ядру;

— обнаружено неожиданное присутствие ионов  $\text{Fe}^+$  в плазме кометы Галлея.

Количественный анализ этих и ряда других выявленных особенностей околокометной плазмы еще окончательно не завершен. Опубликованные к настоящему времени данные отдельных экспериментов открывают дорогу к их совместному анализу и обнаружению деталей, ускользнувших на весьма коротком первом этапе качественного анализа.

В заключение авторы выражают свою благодарность Л. А. Лежен за помощь в оформлении текста этой работы.

1. Андреев В. Е., Вышлов А. С. Особенности распространения радиоволн в оболочке кометы Галлея. XV Всесоюзная конференция по распространению радиоволн. Тезисы докладов. 1987, Алма-Ата, 170
2. Андреев В. Е., Вышлов А. С., Гаврик А. Л., Лясковская В. И., Набатов А. С., Селезнев В. В. Характеристики радиосигналов при радиопросвечивании кометы Галлея. Косм. исследов. 1989, Т. 27
3. Баранов В. Б., Зайцев Н. А., Лебедев М. Г. Модель взаимодействия кометных атмосфер с солнечным ветром. Астрон. Ж. 1986, Т. 63, 170—180
4. Баранов В. Б., Лебедев М. Г. Самосогласованная газодинамическая модель обтекания ионосферы кометы солнечным ветром с учетом эффекта «нагружения». Письма в АЖ. 1986, Т. 12, 551—556
5. Бреус Т. К., Крымский А. М., Луман Дж. Нагружение солнечного ветра у кометы Галлея: уроки для Венеры Косм. исследов. 1988, Т. 26, 68—76
6. Вайсберг О. Л., Застенкер Г. Н., Смирнов В. Н., Хазанов Б. И., Захаров Д. С., Лейбов А. В., Федоров А. О., Климов С. И., Савин С. П., Кравчик З., Збышинский Э. Распределение концентрации тяжелых ионов в голове кометы Галлея. Косм. исследов. 1988, Т. 26, 9—20
7. Варга А., Вундберг Я., Гомбоши Т., Кечкемети Я., Ковач Т., Козма Д., Лохоняи Л., Сабо Л., Сепешвари А., Сюч И., Фараго М., Шомоди А., Бенфальви А., Редл Р., Грингауз К. И., Ремизов А. П., Скурдин Г. А., Клименко И. Н., Владимирова Г. А., Логачев Ю. И., Столповский В. Г. Энерго-масс-спектрометр ионов в диапазоне 20 кэв—13 Мэв для эксперимента «Вега» Научное космическое приборостроение. Т. 4. М.: Металлургия. 1985, 50—54
8. Веригин М. И., Галеев А. А., Грар Р., Грингауз К. И., Ерошенко Е. Г., Климов С. И., Могилевский М. Э., Ремизов А. П., Ридлер В., Сагдеев Р. З., Савин С. П., Сеге К., Соколова А. Ю., Татральяи М., Швингеншу К. Физические процессы в окрестности кометопаузы по данным прямых измерений плазмы, магнитного поля и волн на КА «Вега-2». Письма в АЖ, 1987, Т. 13, 917—926
9. Веригин М. И., Эксфорд И., Грингауз К. И., Рихтер А. О возможном экспериментальном обнаружении ускорения кометной плазмы, связанного с изменением направления магнитного поля, по данным прибора «Плазмаг-1» на космическом аппарате «Вега-1». Космич. исслед. 1987, Т. 25, 921—926
10. Веригин М. И., Грингауз К. И., Рихтер А. К., Гомбоши Т., Ремизов А. П., Сеге К., Апати И., Сэмэрзи И., Татральяи М., Лежен Л. А. Особенности плазменной переходной области (кометошита) по данным КА «Вега-1» и «Вега-2». Космич. исслед. 1987, Т. 25, 907—913
11. Галеев А. А., Хабибрахманов И. Х. О природе плазменных волн в торе Ио. Письма в АЖ, 1985, Т. 11, 292—297
12. Галеев А. А., Липатов А. С., Сагдеев Р. З. Численное моделирование околокометных ударных волн: Особенности структуры и механизмы диссипации энергии. ЖЭТФ. 1985, Т. 89, 1495—1504
13. Галеев А. А., Грибов Б. Э., Гомбоши Т., Грингауз К. И., Климов С. И., Оберц П., Ремизов А. П., Ридлер В., Сагдеев Р. З., Савин С. П., Соколова А. Ю., Шапиро В. Д., Шевченко В. И., Сеге К., Веригин М. И., Ерошенко Е. Г. Положение и структура ударной волны у кометы Галлея по измерениям на КА «Вега-1» и «Вега-2». Космич. исслед. 1987, Т. 25, 900—906
14. Галеев А. А., Хабибрахманов И. Х. О механизме формирования резкой плазменной границы при стагнации солнечного ветра внутри кометных атмосфер. Письма в АЖ. 1988, Т. 14, 267—271

15. *Грар Р., Бегин К., Могилевский М., Михайлов Ю., Молчанов О., Педерсен А., Тротиньон Ж.-Г., Формизано В.* Наблюдения электрических полей и плазмы вблизи кометы Галлея. Письма в АЖ, 1986, Т. 12, 683—687
16. *Грар Р., Могилевский М. М., Михайлов Ю. М., Молчанов О. А., Педерсен А., Тротиньон Ж.-Г., Бегин К., Формизано В.* Плазменно-волновые измерения в окрестности кометы Галлея. Косм. исследов. 1988, Т. 26, 3—8
17. *Грингауз К. И., Скуридин Г. А., Ремизов А. П., Волков Г. И., Владимирова Г. А., Денищикова Л. И., Клименко И. Н., Гомбоши Т., Апати И., Сэмэрзи И., Редл Л., Сэндро Ш., Шомоди А.* Плазменная аппаратура для изучения взаимодействия солнечного ветра с атмосферой кометы Галлея и исследования кометной ионосферы. Научное космическое приборостроение. Т. 4. М.: Металлургия. 1985, 42—49
18. *Грингауз К. И., Гомбоши Т., Ремизов А. П., Апати И., Сэмэрзи И., Веригин М. И., Денищикова Л. И., Дьячков А. В., Кепплер Е., Клименко И. Н., Гомбоши Т., Рихтер А. К., Шомоди А., Сеге К., Сендре С., Татралья М., Варга А., Владимирова Г. А.* Первые прямые измерения плазмы и нейтрального газа у кометы Галлея: Первоначальные результаты с космических аппаратов «Вега». Письма в АЖ. 1986, Т. 12, 666—674
19. *Грингауз К. И., Веригин М. И., Рихтер А. К., Гомбоши Т., Сеге К., Татралья М., Ремизов А. П., Апати И.* Область кометных ионов в голове кометы Галлея по данным космического аппарата «Вега-2». Космич. исслед. 1987, Т. 25, 914—921
20. *Грингауз К. И., Ремизов А. П., Веригин М. И., Рихтер А. К., Татралья М., Сеге К., Клименко И. Н., Апати И., Гомбоши Т., Сэмэрзи И.* Электронная компонента плазмы в окрестности кометы Галлея по данным электростатического анализатора комплекса «Плазмаг-1» на «Вега-2». Космич. исслед. 1987, Т. 25, 927—931
21. *Кечкемети К., Кравенс Т., Афонин В. В., Варга А., Венцель К., Веригин М. И., Лу Ган, Гомбоши Т., Грингауз К. И., Ерошенко Е. Г., Кепплер Е., Клименко И. Н., Марсен Р., Нэзи А., Ремизов А. П., Ридлер В., Рихтер А. К., Сеге К., Татралья М., Швингеншу К., Шомоди А., Эрдеш Г.* Измерения энергичных кометных ионов в солнечном ветре перед ударной волной кометы Галлея. Космич. исследования. 1987, Т. 25, 932—942
22. *Климов С., Савин С. П., Алексевич Я., Аванесова Г., Балебанов В., Балхин М., Галеев А., Грибов Б., Ноздрачев М., Смирнов В., Соколов А., Вайсберг О., Оберц П., Кравчик З., Гжедзельски С., Юхневич Ю., Новак К., Орловски Д., Парфянович Г., Збышински З., Войта Я., Триска П.* Крайне низкочастотные (КНЧ) плазменные волны в окрестности кометы Галлея. Письма в АЖ. 1986, Т. 12, 683—687
23. *Климов С. И., Кравчик З., Корепанов В. Е., Савин С. П., Балебанов В. М., Симоненко Г. Б., Новак К., Алексевич А. Н., Соколов А. Ю.* Исследования плазменных волн на АМС «Вега» Космич. исследов. 1987, Т. 25, 943—951
24. *Краснопольский В. А., Морельс Г., Гогошев М., Мороз В. И., Крыско А. А., Барке В. В., Жезуев В. С., Санько Н. Ф., Трошин В. С., Томашова Г. В., Ткачук Л. Ю., Паршев В. А., Новиков Б. С., Сулаков И. Н., Федоров О. С., Клермиди Ж., Венсан М., Мужен Б., Паризо Ж. П., Цуккони Ж. М., Лепаж Ж. П., Рюнаво Ж., Берто Ж.-Л., Бламон Ж. Е., Фесту М., Эрсс М., Гогошева Ц., Саргоишев С., Палазов К., Георгиев А., Недков И., Канев К., Вальничек Б., Ваничек В.* Эксперимент ТКС на «Вега-2»: некоторые результаты спектроскопии кометы Галлея. Письма в АЖ. 1986, Т. 12, 616—623
25. *Липатов А. С., Сыроватский И. Н.* Численное моделирование околокометных квазипараллельных ударных волн. Косм. исследов. 1987, Т. 25, 952—957

26. Мороз В. И., Комб М., Григорьев А. В., Крифо Ж. Ф., Энкреназ Т., Кровизье Ж., Бибринг Ж. П., Сянько Н. Ф., Корон Н., Бокле-Морван Д., Никольский Ю. В., Жиспер Р., Ламарр Ж. М., Краснопольский В. А., Эмериш К., Рокар Р., Оуэн Т. Результаты эксперимента ИКС. I. Инфракрасное излучение родительских молекул в комете Галлея. Косм. исследов. 1987, Т. 25, 781—792
27. Ремизов А. П., Веригин М. И., Грингауз К. И., Апати И., Сэмэрзи И., Гомбоши Т., Рихтер А. К. Измерения концентрации нейтральных частиц вблизи кометы Галлея комплексом приборов Плазмаг-1 на космических аппаратах «Вега-1» и «Вега-2». Косм. исследов. 1987, Т. 25, 895—899
28. Ридлер В., Швингеншу К., Ерошенко Е. Г., Стяжкин В. А., Рассел К. Т. Наблюдение магнитного поля в комете Галлея. Письма в АЖ. 1986, Т. 12, 647—653
29. Савич Н. А., Алтунин В. И., Андреев В. Е., Басос Ю. Ф., Богуславская Н.-Е. Е., Вышлов А. С., Гаврик А. Л., Дорошук О. Н., Кручкович М. М., Лясковская В. И., Молотов Е. П., Морской И. М., Набатов А. С., Овсянникова М. А., Селезнев В. В., Суханов К. Г., Шевердяев А. С. Двухчастотное радиозондирование кометы Галлея при пролете космических аппаратов «Вега-1» и «Вега-2». Письма в АЖ. 1986, Т. 12, 675—682
30. Савич Н. А., Вышлов А. С. Двухчастотное радиозондирование кометы Галлея. XVI Международный симпозиум по космической технологии и науке. Саппоро. Май 1988
31. Сагдеев Р. З., Бламон Ж., Галеев А. А., Ковтуненко В. М., Мороз В. И., Сеге К., Шапиро В. Д., Шевченко В. И. Встреча космических аппаратов «Вега-1» и «Вега-2» с кометой Галлея. Письма в АЖ. 1986, Т. 12, 581—592
32. Сагдеев Р. З., Киссель И., Берто Ж. Л., Ангаров В. Н., Бламон Ж. Е., Бюхлер К., Евланов Е. Н., Зубков Б. В., Манагадзе Г. Г., Подколзин С. Н., Табалдыев С. Р., Фоменкова М. Н., Хернер Н., Хромов В. Н., Шапиро В. Д. Первые результаты измерений элементного состава пылевых частиц кометы Галлея, полученные приборами ПУМА в проекте «Вега». Письма в АЖ. 1986, Т. 12, 604—610
33. Сагдеев Р. З., Евланов Е. Н., Зубков Б. В., Мухин Л. М., Прилуцкий О. Ф., Фоменкова М. Н., Хромов В. Н. Анализ состава пылевых частиц кометы Галлея по результатам измерений прибором ПУМА в режиме нулевой моды. Космич. исслед. 1987, Т. 25, 849—855
34. Сагдеев Р. З., Мухин Л. М., Евланов Е. Н., Зубков Б. В., Прилуцкий О. Ф., Фоменкова М. Н. Классификация пылевых частиц кометы Галлея по данным пылеударного массспектрометра ПУМА-2. Космич. исслед. 1987, Т. 25, 856—859
35. Шомоди А., Грингауз К. И., Сеге К., Сабо Л., Козма Д., Ремизов А. П., Эре Я., Клименко И. Н., Сюч И., Веригин М. И., Виндберг И., Кравенс Т., Дьячков А. В., Эрдеш Г., Фараго М., Гомбоши Т., Кечкемети К., Кепплер Е., Ковач Т., Кондор А., Логачев Ю. И., Лохоняи Л., Марсден Р., Редл Р., Рихтер А. К., Столповский В. Г., Сабо И., Сентпетери И., Сепешвари А., Татральяи М., Варга А., Венцель К., Владимирова Г. А., Заранди А. Первые прямые измерения энергичных частиц вблизи кометы Галлея. Письма в АЖ. 1986, Т. 12, 659—665
36. Acuna M. H., Glassmeier K. H., Burlaga L. F., Neubauer F. M., Ness N. F. Upstream Waves of Cometary Origin Detected by the Giotto Magnetic Field Experiment Exploration of Halley's Comet. ESA SP-250, 1986, V. 3, PP. 447—449
37. Amata E., Formisano V., Cerulli-Irelli R., Torrente P., Johnstone A. D., Coates A., Wilken B., Jockers K., Winningham J. D., Bryant D., Borg H., Thomsen M. The Cometopause Region at comet Halley. Exploration of Halley's Comet. ESA SP-250, 1986, V. 1, PP. 213—218
38. Anderson K. A., Carlson C. B., Curtis C. W., Lin R. P., Reme H., Sauvaud J. A., d'Uston C., Korth A., Richter A. K., Mendis D. A. The Up-

- stream Region, Foreshock and Bow Shock Wave at Halley's Comet from Plasma Electron Measurements. *Exploration of Halley's Comet*. ESA SP-250. 1986, V. 1, PP. 259—261
39. Anderson K. A., Carlson C. B., Curtis C. W., Lin R. P., Reme H., Sauvaud J. A., d'Uston C., Korth A., Richter A. K., Mendis D. A. The Upstream Region, Foreshock and Bow Shock Wave at Comet P/Halley from Plasma Electron Measurements. *Astron. Astrophys.* 1987, V. 187, PP. 290—292
  40. Apati I., Remizov A. P., Gringauz K. I., Balebanov V. M., Szemerey I., Szendro S., Gombosi T., Klimentko I. N., Verigin M. I., Keppler E., Richter A. K. Plasmag-1 Experiment: Solar Wind Measurements During the Closest Approach to Comet Giacobini—Zinner by the ICE Probe and to Comet Halley by Giotto and Susei Spacecraft. *Exploration of Halley's Comet*. ESA SP-250. 1986, V. 1, PP. 65—70
  41. Balebanov V. M., Gringauz K. I., Verigin M. I. Plasma Phenomena in the Vicinity of the Closest Approach of Vega-1, -2 Spacecraft to the Halley Comet Nucleus. *Symposium on Diversity and Similarity of Comets*. ESA SP-278. 1987, PP. 119—124
  42. Balsiger H., Altwegg K., Buhler F., Fisher J., Geiss J., Meier A., Rettenmund U., Rosenbauer H., Schwenn R., Benson J., Hemmerich P., Sager K., Kulzer G., Neugebauer M., Goldstein B. E., Goldstein R., Shelley E. G., Sanders T., Simpson D., Lazarus A. J., Young D. T. The Giotto Ion Mass Spectrometer. *The Giotto Mission—Its Scientific Investigations* (ed. by R. Reinhard, B. Battrock) ESA SP-1077. 1986, PP. 129—148
  43. Balsiger H., Altwegg K., Buhler F., Geiss J., Ghielmetti A. G., Goldstein B. E., Goldstein R., Huntress W. T., Ip W.-H., Lazarus A. J., Meier A., Neugebauer M., Rettenmund U., Rosenbauer H., Schwenn R., Sharp R. D., Shelley E. G., Ungstrup E., Young D. T. Ion Composition and Dynamics at Comet Halley. *Nature*. 1986, V. 321, PP. 330—334
  44. Balsiger H., Altwegg K., Buhler F., Fuselier S. A., Geiss J., Goldstein R., Lazarus A. J., Meier A., Neugebauer M., Rettenmund U., Rosenbauer H., Schwenn R., Shelley E. G., Ungstrup E., Young D. T. The Composition and Dynamics of Cometary Ions in the Outer Coma of Halley. *Exploration of Halley's Comet*. ESA SP-250. 1986, V. 1, PP. 99—103
  45. Balsiger H., Altwegg K., Buhler F., Fuselier S. A., Geiss J., Goldstein B. E., Goldstein R., Huntress W. T., Ip W.-H., Lazarus A. J., Meier A., Neugebauer M., Rettenmund U., Rosenbauer H., Schwenn R., Shelley E. G., Ungstrup E., Young D. T. The Composition and Dynamics of Cometary Ions in the Outer Coma of Comet P/Halley. *Astron. Astrophys.* 1987, V. 187, PP. 163—168
  46. Balsiger H. Measurements of Ion Species within the Coma of Comet Halley from GIOTTO. *Comet Halley 1986, World Wide Investigations, Results and Interpretations*. Ellis Horwood Limited. 1988. Chichester. England.
  47. Baranov V. B., Lebedev M. G. Solar wind flow past cometary ionosphere. *Astrophys. Space Sci.* 1988, V. 147, PP. 69—90
  48. Baumgartel K., Sauer K. Fluid Simulation of the Comet P/Halley's Ionosphere. *Astron. Astrophys.* 1987, V. 187, PP. 307—310
  49. Berthelier J. J., Illiano J. M., Hodges R. R., Krankowsky D., Eberhardt P., Lammerzahl P., Hoffman J. H., Herrwerth I., Woveries J., Dolder U., Schulte W. Angular and Energy Distribution of Low Energy Cometary Ions Measured in the Outer Coma of Comet Halley. *Exploration of Halley's Comet*. ESA SP-250. 1986, V. 1, PP. 175—178
  50. Brandt J. C. The International Cometary Explorer (ICE) Mission to Comets Giacobini—Zinner and Halley. *Space Missions to Halley's Comet* / ed. by R. Reihard, B. Battrock. ESA SP-1066, 1986, PP. 99—115
  51. Brandt J. C., Farquar R. W., Maran S. P., Niedner M. W., Jr., Rosenvinge T. T. The International Cometary Explorer. *Exploration of Halley's*



- Comet (ed. by M. Grewing, F. Praderie, R. Reinhard) 1987. Springer—Verlag. Berlin—Heidelberg—New York, PP. 969—980
52. Coates A. J., Johnstone A. D., Thomsen M. F., Formisano V., Amata E., Wilken B., Jockers K., Winningham J. D., Borg H., Bryant D. A. Solar Wind Flow Through the Halley Bow Shock. Exploration of Halley's Comet. ESA SP-250. 1986, V. 1, PP. 263—268
  53. Coates A. J., Johnstone A. D., Thomsen M. F., Formisano V., Amata E., Wilken B., Jockers K., Winningham J. D., Borg H., Bryant D. A. Solar Wind Flow Through the Comet P/Halley Bow Shock. Astron. Astrophys. 1987, V. 187, P. 55—60
  54. Cravens T. E. The Physics of the Cometary Contact Surface. Exploration of Halley's Comet. ESA SP-250, 1986, V. 1, PP. 241—245
  55. Cravens T. E., Kozyra J. U., Nagy A. F., Gombosi T. I., Kurtz M. Electron Impact Ionization in the Vicinity of Comets. J. Geophys. Res. 1986, V. 92, № A7, PP. 7341—7348
  56. Cravens T. E. Ion Energetic in the Inner Coma of Comet Halley. Geophys. Res. Lett. 1987, V. 14, PP. 983—986
  57. Cravens T. E., Kozyra J. U., Nagy A. F., Gombosi T. I., Kurtz M. Electron Impact Ionization in the Vicinity of Comets. J. Geophys. Res. 1986, V. 92, № A7, PP. 7341—7348
  58. Daly P. W., Kirsch E., McKenna-Lawlor S., O'Sullivan D., Thomson A., Sanderson T. R., Wenzel K. P. Comparison of Energetic Ion Measurements at Comets Giacobini—Zinner and Halley. Exploration of Halley's Comet. ESA SP-250. 1986, V. 3, PP. 179—183
  59. D'Uston C., Reme H., Sauvaud J. A., Cros A., Anderson K. A., Carlson C. W., Curtis D., Lin R. P., Korth A., Richter A. K., Mendis A. Description of the Main Boundaries Seen by the Giotto Electron Experiment Inside the Comet Halley—Solar Wind Interaction Region Exploration of Halley's Comet. ESA SP-250. 1986, V. 1, PP. 77—80
  60. D'Uston C., Reme H., Sauvaud J. A., Cros A., Anderson K. A., Carlson C. W., Curtis D., Lin R. P., Korth A., Richter A. K., Mendis A. Description of the Main Boundaries Seen by the Giotto Electron Experiment Inside Comet P/Halley—Solar Wind Interaction Region. Astron. Astrophys. 1987, V. 187, PP. 137—140
  61. D'Uston C., Reme H., Sauvaud J. A., Carlson C. W., Anderson K. A., Curtis D. W., Lin R. P., Korth A., Mendis D. A. Properties of Plasma Electrons in the Magnetic Pile—up Region of Comet Halley. Annales Geophysicae. 1989, V. 7, № 1, PP. 91—96
  62. Eberhardt P., Krankowsky D., Schulte W., Dolder U., Lammerzahn P., Berthelier J. J., Woveries J., Stubbemann U., Hodges R. R., Hoffman J. H., Illiano J. M. The CO and N<sub>2</sub> Abundance in Comet P/Halley. Astron. Astrophys. 1987, V. 187, PP. 481—484
  63. Eberhardt P., Dolder U., Schulte W., Krankowsky D., Lammerzahn P., Hoffman J. H., Hodges R. R., Berthelier J. J., Illiano J. M. The D/H Ratio in Water from Halley. Astron. Astrophys. 1987, V. 187, PP. 435—437
  64. Eviatar A., Goldstein B. E. A Unidimensional Model of Comet Ionosphere Structure. J. Geophys. Res. 1988, V. 93, PP. 1759—1765
  65. Feldman P. D., A'Hearn M. F., Festou M. C., McFadden L. A., Weaver H. A., Woods T. N. Is CO<sub>2</sub> Responsible for the Outburst of Comet Halley? Nature. 1986, V. 324, PP. 433—436
  66. Festou M. C. Aeronomical Processes in Cometary Atmospheres: The Carbon Compounds Puzzle. Adv. Space Res. 1984, V. 4, № 9, PP. 165—175
  67. Festou M. C., Feldman P. D., A'Hearn M. F., Arpigny C., Cosmovici C. W., Danks A. C., McFadden L. A., Gilmozzi R., Patriachi P., Tozzi G. P., Wallis M. K., Weaver H. A. IUE Observations of Comet Halley During the Vega and Giotto Encounters. Nature. 1986, V. 321, PP. 361—363

68. *Formisano V., Galeev A. A., Sagdeev R. Z.* The Role of Critical Ionization Velocity Phenomena in the Production of Inner Coma Cometary Plasma. *Planet. Space Sci.* 1982, V. 30, PP. 491—497
69. *Formisano V., Amata E., Wilken B., Jockers K., Johnstone A. D., Coates A., Heath J., Thomsen M., Winnigham J. D., Borg H., Bryant D. A.* Giotto Observations of the Bow Shock at Comet Halley. *Adv. Space Res.* 1986, V. 6, № 1, PP. 229—234
70. *Fuselier S. A., Feldman W. C., Bame S. J., Smith E. J., Scarf F. L.* Heat Flux Observations and the Location of the Transition Region Boundary of Giacobini—Zinner. *Geophys. Res. Lett.* 1986, V. 13, PP. 247—250
71. *Fuselier S. A., Anderson K. A., Balsiger H., Glassmeier K. H., Goldstein B. E., Neugebauer M., Rosenbauer H., Shelley E. G.* The Foreshock Region Upstream from the Comet Halley Bow Shock. Symposium on the Diversity and Similarity of Comets. ESA SP-278, 1987, PP. 77—82
72. *Fuselier S. A., Shelley E. G., Balsiger H., Geiss J., Goldstein B. F., Goldstein R., Ip W.-H.* Cometary  $\text{He}_2^+$  and Solar Wind  $\text{He}^{++}$  Dynamics Across the Halley Cometopause. *Geophys. Res. Lett.* 1988, V. 15, № 6, PP. 549—552
73. *Galeev A. A., Lipatov A. S.* Plasma Processes in Cometary Atmospheres. *Adv. Space Res.* 1984, V. 4, № 9, PP. 229—237
74. *Galeev A. A., Cravens T. E., Gombosi T. I.* Solar Wind Stagnation near Comets. *Astrophys. J.* 1985, V. 289, PP. 807—819
75. *Galeev A. A.* Solar Wind Interaction with Comet Halley. *Adv. Space Res.* 1985, V. 5, № 12, PP. 155—163
76. *Galeev A. A., Gribov B. E., Gombosi T. I., Gringauz K. I., Klimov S. I., Oberz P., Remizov A. P., Riedler W., Sagdeev R. Z., Savin S. P., Sokolov A. Yu., Shapiro V. D., Shevchenko V. I., Szego K., Verigin M. I., Eroshenko Ye. G.* Position and Structure of the Comet Halley Bow Shock: Vega-1 and Vega-2 Measurements. *Geophys. Res. Lett.* 1986, V. 13, PP. 841—844
77. *Galeev A. A., Gringauz K. I., Klimov S. I., Remizov A. P., Sagdeev R. Z., Savin S. P., Sokolov A. Yu., Verigin M. I., Szego K.* Critical Ionisation Velocity Effects in the Inter Coma of Comet Halley: Measurements by Vega-2. *Geophys. Res. Lett.* 1986, V. 13, PP. 845—849
78. *Galeev A. A.* Theory and Observations of Solar Wind—Cometary Plasma Interaction Processes. Exploration of Halley's Comet. ESA SP-250. 1986, V. 1, PP. 3—17
79. *Galeev A. A.* Encounter with Comets: Discoveries and Puzzles in Cometary Plasma Physics. *Astron. Astrophys.* 1987, V. 187, PP. 12—20
80. *Galeev A. A., Gringauz K. I., Klimov S. I., Remizov A. P., Sagdeev R. Z., Savin S. P., Sokolov A. Yu., Verigin M. I., Szego K., Tatralayay M., Grand R., Eroshenko Ye. G., Mogilevsky M. J., Riedler W., Schwingschuh K.* Physical Processes in the Vicinity of the Cometopause Interpreted on the Basis of Plasma, Magnetic Field and Plasma Wave Data Measured on Board the Vega-2 Spacecraft. Symposium on the Diversity and Similarity of Comets. ESA SP-278. 1987, PP. 83—87
81. *Galeev A. A., Gringauz K. I., Klimov S. I., Remizov A. P., Sagdeev R. Z., Savin S. P., Sokolov A. Yu., Verigin M. I., Szego K., Tatralayay M., Grand R., Eroshenko Ye. G., Mogilevsky M. J., Riedler W., Schwingschuh K.* Physical Processes in the Vicinity of the Cometopause Interpreted on the Basis of Plasma, Magnetic Field and Plasma Wave Data Measured on Board the Vega-2 Spacecraft. *J. Geophys. Res.* 1988, V. 93, № A7, PP. 7527—7531
82. *Gary S. P., Hinata S., Madland C. D., Winske D.* The Development of Shell-like Distribution from Newborn Cometary Ions. *Geophys. Res. Lett.* 1986, V. 13, PP. 1364—1367
83. *Geiss J., Boshler P., Ogilvie K. W., Caplan M. A.* Origin of Metal Ions in the Coma of P/Giacobini—Zinner. *Astron. Astrophys.* 1986, V. 166, PP. L1—L4

84. *Glasmeyer K. H., Neubauer F. M., Acuna M. H., Mariani F.* Strong Hydromagnetic Fluctuations in the Comet P/Halley Magnetosphere Observed by the Giotto Magnetic Field Experiment. Exploration of Halley's Comet. ESA SP-250. 1986, V. 3, PP. 167—171
85. *Glasmeyer K. H., Neubauer F. M., Acuna M. H., Mariani F.* Low-Frequency Magnetic Field Fluctuations in Comet P/Halley's Magnetosheath: Giotto Observations. Astron. Astrophys. 1987, V. 187, PP. 65—68
86. *Goldstein B. E., Neugebauer M., Balsiger H., Drake J., Fuselier S. A., Goldstein R., Ip W.-H., Retternmund U., Rosenbauer H., Schwenn R., Selley E. G.* Giotto—IMS Observation of Ion Flow Velocities and Temperatures Outside the Contact Surface of Comet Halley. Exploration of Halley's Comet. ESA SP-250, 1986, V. 1, PP. 229—233
87. *Goldstein B. E., Neugebauer M., Balsiger H., Drake J., Fuselier S. A., Goldstein R., Ip W.-H., Retternmund U., Rosenbauer H., Schwenn R., Selley E. G.* Giotto—IMS Observation of Ion-flow Velocities and Temperatures Outside the Magnetic Cavity of Comet P/Halley. Astron. Astrophys. 1987, V. 187, PP. 174—178
88. *Goldstein R., Young D. T., Balsiger H., Buehler F., Goldstein B. E., Neugebauer M., Rosenbauer H., Schwenn R., Selley E. G.* Hot Ions Observed by the Giotto Ion Mass Spectrometer inside the Comet Halley Contact Surface. Exploration of Halley's Comet. ESA SP-250. 1986, V. 1, PP. 207—211
89. *Goldstein R., Young D. T., Balsiger H., Buehler F., Goldstein B. E., Neugebauer M., Rosenbauer H., Schwenn R., Selley E. G.* Hot Ions Observed by the Giotto Ion Mass Spectrometer at the Comet P/Halley Contact Surface. Astron. Astrophys. 1987, V. 187, PP. 220—224
90. *Gombosi T. I.* Charge Exchange Avalanche at the Cometopause Geophys. Res. Lett. 1988, V. 14, PP. 1174—1177
91. *Gosling J. T., Asbridge J. R., Bame S. J., Thomsen M. F., Zwickl R. D.* Low Amplitude, Low Frequency Plasma Fluctuations at Comet Giacobini—Zinner. Geophys. Res. Lett. 1986, V. 13, PP. 267—271
92. *Grard R., Apathy I., Gringauz K., Grun E., McDonell J., Thieman H.* Interpretation of the Measurements of Secondary Electron Currents Induced by Impacts During the Flyby of Comet Halley. Adv. Space Res. 1985, V. 5, № 12, PP. 149—154
93. *Grard R., Pedersen A., Knott K., Trotignon J.-G., Beghin C., Formisano V., Moguilevski M., Michailov Y., Molchanov O.* Wave and Plasma Measurements on the Vega-1 and Vega-2 Spacecraft in the Environment of Comet Halley. Adv. Space Res. 1985, V. 5, № 12, PP. 175—180
94. *Grard R., Gombosi T., Sagdeev R. Z.* The Vega Missions. Space Missions to Halley's Comet (ed. by R. Reihard, B. Battrick) ESA SP-1066. 1986, PP. 49—70
95. *Grard R.* The Plasma and Wave Experiment on VEGA (EPINOCHE—APV-V). Field, Particle and Wave Experiments on Cometary Missions. Graz: Austria Academy of Sciences Publication. 1986, PP. 175—185
96. *Grard R., Gringauz K. I.* Electron Emission by Gas and Dust Impacts During the Flybys of Comet Halley. Geophys. Res. Letters 1986, V. 13, PP. 877—879
97. *Grard R., Pedersen A., Trotignon J.-G., Beghin C., Mogilevsky M., Mikhailov Y., Molchanov O., Formisano V.* Observations of Waves and Plasma in the Environment of Comet Halley. Nature. 1986, V. 321, PP. 290—291
98. *Grard R. J. L., McDonell J. A. M., Grun E., Gringauz K. I.* Secondary Electron Emission Induced by Gas Dust Impacts on Giotto, Vega-1 and Vega-2 in the Environment of Comet Halley Exploration of Halley's Comet. ESA SP-250. 1986, V. 1, PP. 327—331
99. *Grard R., Scarf F., Trotignon J. G., Mogilevsky M.* A Comparison Between Wave Observations Performed in the Environments of Comet Hal-

- ley and Giacobini—Zinner. Symposium on Diversity and Similarity of Comets. ESA SP-278. 1987, PP. 97—105
100. *Grard R. J. L., McDonell J. A. M., Grun E., Gringauz K. I.* Secondary Electron Emission Induced by Gas and Dust Impacts on Giotto, Vega-1 and Vega-2 in the Environment of Comet P/Halley. *Astron. Astrophys.* 1987, V. 187, PP. 785—788
  101. *Gribov B. E., Kecskemety K., Sagdeev R. Z., Shapiro V. D., Shevchenko V. I., Somogyi A. J., Szego K., Erdos G., Eroshenko E. G., Gringauz K. I., Keppler E., Marsden R., Remizov A. P., Richter A. K., Riedler W., Schwingenschuh K., Wenzel K. P.* Stochastic Fermi Acceleration of Ions in the Pre-shock Region of Comet Halley. *Exploration of Halley's Comet. ESA SP-250, 1986, V. 1, PP. 271—275*
  102. *Gribov B. E., Kecskemety K., Sagdeev R. Z., Shapiro V. D., Shevchenko V. I., Somogyi A. J., Szego K., Erdos G., Eroshenko E. G., Gringauz K. I., Keppler E., Marsden R. G., Remizov A. P., Richter A. K., Riedler W., Schwingenschuh K., Wenzel K. P.* Stochastic Fermi Acceleration of Ions in the Pre-shock Region of Comet P/Halley. *Astron. Astrophys.* 1987, V. 187, PP. 293—296
  103. *Gringauz K. I., Apathy I., Denshikova L. I., Gombosi T., Keppler E., Klimenko I. N., Remizov A. P., Richter A. K., Skuridin G. A., Somodi A., Szabo L., Szemerey I., Szendro S., Verigin M. I., Vladimirova G. A., Volkov G. I.* The VEGA Probe Instrument Package for Measuring Charged Particles with Energies less than 25 keV. *Cometary Exploration III.* Budapest: Central Res. Inst. Phys. Press. 1983, PP. 333—350
  104. *Gringauz K. I., Gombosi T. I., Remizov A. P., Apathy I., Szemerey I., Verigin M. I., Denshikova L. I., Dyachkov A. V., Keppler E., Klimenko I. N., Richter A. K., Somogyi A. J., Szego K., Szendro S., Tatrallyay M., Varga A., Vladimirova G. A.* First Results of Plasma and Neutral Gas Measurements From VEGA 1/2 near Comet Halley. *Adv. Space Res.* 1985, V. 5, № 12, PP. 165—174
  105. *Gringauz K. I., Klimenko I. N., Remizov A. P., Vladimirova G. A., Apathy I., Szego K., Szemerey I., Szendro S., Tatrallyay M., Keppler E., Richter A.* The VEGA Plasmag-1 Experiment: Description and First Results. *Field, Particle and Wave Experiments on Cometary Missions.* Graz: Austria Academy of Sciences Publication. 1986, PP. 203—216
  106. *Gringauz K. I., Gombosi T. I., Remizov A. P., Apathy I., Szemerey I., Verigin M. I., Denshikova L. I., Dyachkov A. V., Keppler E., Klimenko I. N., Richter A. K., Somogyi A. J., Szego K., Szendro S., Tatrallyay M., Varga A., Vladimirova G. A.* First In Situ Plasma and Neutral Gas Measurements at Comet Halley. *Nature.* 1986, V. 321, PP. 282—285
  107. *Gringauz K. I., Gombosi T. I., Tatrallyay M., Verigin M. I., Remizov A. P., Richter A. K., Apathy I., Szemerey I., Dyachkov A. V., Balakina O. V., Nagy A. F.* Detection of a New «Chemical» Boundary at Comet Halley. *Geophys. Res. Lett.* 1986, V. 13, PP. 613—616
  108. *Gringauz K. I., Verigin M. I., Richter A. K., Gombosi T. I., Szego K., Tatrallyay M., Remizov A. P., Apathy I.* Cometary Plasma Region in the Coma of Comet Halley: Vega-2 Measurements. *Exploration of Halley's Comet. ESA SP-250 1986, V. 1, PP. 93—97*
  109. *Gringauz K. I., Remizov A. P., Verigin M. I., Richter A. K., Tatrallyay M., Szego K., Klimenko I. N., Apathy I., Gombosi T. I., Szemerey T.* Electron Component of the Plasma Around Halley's Comet Measured by the Electrostatic Electron Analyzer of PLASMAG-1 on Board Vega-2 *Exploration of Halley's Comet. ESA SP-250, V. 1, PP. 195—198*
  110. *Gringauz K. I., Verigin M. I., Richter A. K., Gombosi T. I., Szego K., Tatrallyay M., Remizov A. P., Apathy I.* Quasiperiodic Features and the Radial Distribution of Cometary Ions in the Cometary Plasma Region of Comet P/Halley. *Astron. Astrophys.* 1987, V. 187, PP. 191—194
  111. *Gringauz K. I., Remizov A. P., Verigin M. I., Richter A. K., Tatrallyay M., Szego K., Klimenko I. N., Apathy I., Gombosi T. I., Szemerey T.* Analy-

- sis of Electron Measurements from the Plasmag-1 Experiment on Board Vega-2 in the Vicinity of Comet P/Halley. *Astron. Astrophys.* 1987, V. 187, PP. 287—289
112. *Gringauz K. I., Verigin M. I., Remizov A. P., Oraevsky A. A., Richter A. K., Szego K., Varga A.* The Analysis of Neutral Gas Distribution in the Comet Halley Environment Based on In-situ Vega-1, 2 Data. Twenty-seventh plenary meeting of the Committee on Space Research, 18—29 July 1988. Espoo. Finland. Abstracts. P. 837.
  113. *Gringauz K. I., Verigin M. I.* Some Results of Neutral and Charged Particle Measurements in the Vicinity of Comet P/Halley Aboard VEGA-1, 2 Spacecraft. Comet Halley 1986, World Wide Investigations, Results and Interpretations. Ellis Horwood Limited. 1989. Chichester. England.
  114. *Hazer L.* Distribution d'intensite dans la tete d'une comete Bull. Acad. Roy. Belgique. Classe des Sciences. 1957, V. 43, PP. 740—743
  115. *Hazer L.* Calcul de distribution d'intensite relative dans une tete cometaire. Nature et origine des cometes. 13-th Liege Symp. 1966, PP. 233—241
  116. *Haerendel G.* Plasma Flow and Critical Velocity Ionization in Cometary Comae. *Geophys. Res. Lett.* 1986, V. 13, PP. 255—258
  117. *Haerendel G.* Plasma Transport Near the Magnetic cavity Surrounding Comet Halley. *Geophys. Res. Lett.* 1987, V. 14, PP. 673—676
  118. *Hirao K., Itoh T.* Project Overview and Highlights of SUISEI and SAKIGAKE. *Adv. Space Res.* 1985, V. 5, № 12, PP. 55—64
  119. *Hirao K.* The Suisei/Sakigake (Planet—A/MS-T5) Missions. Space Missions to Halley's Comet / ed. by R. Reihard, B. Battrick. ESA SP-1066. 1986, PP. 71—84
  120. *Hirao K., Itoh T.* The Planet-A Halley Encounters *Nature.* 1986, V. 321, PP. 294—297
  121. *Hirao K., Itoh T.* The Sakigake/Suisei Encounter with Comet P/Halley. *Astron. Astrophys.* 1987, V. 187, PP. 39—46
  122. *Hirao K., Itoh T.* The Sakigake/Suisei Missions to Halley's Comet. Exploration of Halley's Comet / ed. by M. Grewing, F. Praderie, R. Reinhard. 1987. Springer—Verlag. Berlin—Heidelberg—New York, PP. 965—968
  123. *Hodges R. R., Illiano J. M., Bertheliet J. J., Krankowsky D., Lammerz P., Woweries J., Stubbemann U., Hoffman J. H., Eberhardt P., Dolder U., Schulte W.* Measurements of Thermal Ion Energy Spectra from Giotto Encounter with Comet Halley. Exploration of Halley's Comet. ESA SP-250. 1986, V. 3, PP. 415—418
  124. *Huebner W. F., Boice D. C., Sharp C. M., Korth A., Lin R. P., Mitchell D. L., Reme H.* Evidence for First Polymer in Comet Halley: Polyoxymethylene. Symposium on Diversity and Similarity of Comets. ESA SP-278. 1987, PP. 163—167
  125. *Huebner W. F.* First Polymer in Space Identified in Comet Halley. *Science.* 1987, V. 237, PP. 628—630
  126. *Hynds R. J., Cowley S. W. H., Sanderson T. R., Wenzel K. P., Van Rooijen J. J.* Observations of Energetic Ions from Comet Giacobini—Zinner. *Science.* 1986, V. 232, PP. 361—365
  127. *Ip W.-H., Mendis D. A.* The Generation of Magnetic Fields and Electric Currents in the Cometary Plasma Tails. *Icarus.* 1976, V. 29, PP. 147—151
  128. *Ip W.-H.* Currents in Cometary Atmosphere. *Planet. Space Sci.* 1976, V. 27, PP. 121—125
  129. *Ip W.-H., Axford W. I.* Theories of Physical Processes in the Cometary Comae and in Ion Tails. *Comets* / ed. L. L. Wilkening. Univ. of Arizona Press. Tucson, Arizona. 1982. PP. 588—634
  130. *Ip W.-H., Axford W. I.* The Acceleration of Particles in the Vicinity of Comet. *Planet. and Space Sci.* 1986, V. 34, PP. 1061—1065
  131. *Ip W.-H., Axford W. I.* Metallic Ions in Cometary Comae and Plasma Tails. *Nature.* 1986, V. 321, PP. 682—684
  132. *Ip W.-H., Schwenn R., Rosenbauer H., Balsiger H., Neubauer M., Shelley E. G.* An Interpretation of the Ion Pile—up Region Outside the

- Ionospheric Contact Surface Exploration of Halley's Comet. ESA SP-250. 1986. V. 1, PP. 219—223
133. *Ip W.-H., Axford W. I.* The Formation of a Magnetic-field-free Cavity at Comet Halley. *Nature*. 1987, V. 325, PP. 418—419
  134. *Ip W.-H., Schwenn R., Rosenbauer H., Balsiger H., Neubauer M., Shelley E. G.* An Interpretation of the Ion Pile—up Region Outside the Ionospheric Contact Surface *Astron. Astrophys.* 1987, V. 187, PP. 132—136
  135. *Ip W.-H., Axford W. I.* *Cometary Plasma Physics. Physics of Comets in the Space Age*, ed. by W. F. Huebner. 1988
  136. *Johnstone A. D., Bowles J. A., Coates A. J., Coker A. J., Kellock S. J., Raymond J., Wilken B., Studeman W., Weiss W., Cerulli Irelli R., Formisano W., de Giorgi W., Perani P., de Bernardi M., Borg H., Olsen S., Winningham J. D., Bryant D. A.* The Giotto Three-Dimensional Positive Ion Analyser. The Giotto Mission—Its Scientific Investigations, ed by R. Reinhard, B. Battrock. ESA SP-1077 1986. PP. 15—32
  137. *Johnstone A., Coates A., Kellock S., Wilken B., Jockers K., Rosenbauer H., Studeman W., Weiss W., Formisano V., Amata E., Cerulli-Irelli R., Dobrowolny M., Terenzi R., Egidi A., Borg H., Hultquist B., Winningham J., Gurgido C., Bryant D., Edwards T., Feldman W., Thomsen M., Wallis M. K., Bierman L., Schmidt H., Lust R., Haerendel G., Paschmann G.* Ion Flow at Comet Halley. *Nature*. 1986, V. 321, PP. 344—347
  138. *Johnstone A. D., Coates A. J., Heath J., Thomsen M. F., Wilken B., Jockers K., Formisano V., Amata E., Winningham J. D., Borg H., Bryant D. A.* Variations in the Solar Wind Flow During the Approach to Comet Halley. *Exploration of Halley's Comet. ESA SP-250. 1986, V. 1, PP. 25—27*
  139. *Johnstone A. D., Glassmeier K. H., Acuna M., Borg H., Bryant D., Coates A., Formisano V., Heath J., Mariani F., Musmann G., Neubauer F., Thomsen M., Wilken B., Winningham J.* Waves in the Magnetic Field and Solar Wind Flow Outside the Bow Shock at Comet Halley *Exploration of Halley's Comet. ESA SP-250. 1986. V 1, PP. 277—280*
  140. *Johnstone A. D., Coates A. J., Heath J., Thomsen M. F., Wilken B., Jockers K., Formisano V., Amata E., Winningham J. D., Borg H., Bryant D. A.* Alfvénic Turbulence in the Solar Wind Flow During the Approach to Comet P/Halley. *Astron. Astrophys.* 1987, V. 187, PP. 25—32
  141. *Johnstone A. D., Glassmeier K., Acuna M., Borg H., Bryant D., Coates A., Formisano V., Heath J., Mariani F., Musmann G., Neubauer F., Thomsen M., Wilken B., Winningham J.* Waves in the Magnetic Field and Solar Wind Flow Outside the Bow Shock of Comet P/Halley. *Astron. Astrophys.* 1987, V. 187, PP. 47—54
  142. *Kecskemety K., Gravens T. E., Afonin V. V., Erdos G., Eroshenko E. G., Gan L., Gombosi T. I., Gringauz K. I., Keppler E., Klimentko I. N., Marsden R., Nagy A. F., Remizov A. P., Richter A. K., Riedler W., Schwingenschuh K., Somogyi A. J., Szego K., Tatrallyay M., Varga A., Verigin M. I., Wenzel K. P.* Energetic Pick-up Ions Outside the Comet Halley Bow Shock *Exploration of Halley's Comet. ESA SP-250. 1986, V. 1, PP. 109—114*
  143. *Kecskemety K., Gravens T. E., Afonin V. V., Erdos G., Eroshenko E. G., Gan Lu, Gombosi T. I., Gringauz K. I., Keppler E., Klimentko I. N., Marsden R., Nagy A. F., Remizov A. P., Richter A. K., Riedler W., Schwingenschuh K., Somogyi A. J., Szego K., Tatrallyay M., Varga A., Verigin M. I., Wenzel K. P.* Pickup Ions in the Unshocked Solar Wind at Comet Halley. *J. Geophys. Res.* 1989, V. 94, PP. 185—196
  144. *Keller H. U., Thomas G. E.* A cometary hydrogen model: Comparison with OGO-5 Measurements of Comet Bennett (1970 11). *Astron. Astrophys.* 1975, V. 39, PP. 7—17
  145. *Keller H.-U., Arpigny C., Barbieri C., Bonnett R. M., Cazes S., Coradini M., Cosmovici C. B., Delamer W. A., Huebner W. F., Hughes D. W., Iamar C., Malaise D., Reitsem H. I., Schmidt H. U., Schmidt W. K. H.,*

- Seige P., Whipple F. L., Wihelm K.* First Halley Multicolor Camera Results from Giotto. *Nature*. 1986, V. 321, PP. 320—325
146. *Kissel J., Sagdeev R. Z., Bertaux J. L., Angarov V. N., Audouze J., Blamont J. E., Buchler K., Evlanov E. N., Fechtig H., Fomenkova M. N., von Hoerner H., Inogamov N. A., Khromov V. N., Knabe W., Krueger F. R., Langevin Y., Leonas V. B., Levasseur-Regourd A. C., Managadze G. G., Podkolzin S. N., Shapiro V. D., Tabaldyev S. R., Zubkov B. V.* Composition of Comet Halley Dust from Vega Observations. *Nature*. 1986, V. 321, PP. 280—282
147. *Kissel J., Brownlee D. E., Buhler K., Clark B. C., Fechtig H., Grun E., Horhug K., Inenbergs E. D., Jessberger E. K., Krulger F. R., Kuczerova H., McDonnell J. A. M., Morfil G. M., Rahe J., Schwenn G. H., Sekanina Z., Utterback N. G., Volk H. J., Zook H. A.* Composition of Comet Halley Dust Particles from Giotto Observations. *Nature*. 1986, V. 321, PP. 336—337
148. *Klimov S., Savin S., Aleksevich Ya., Avanesova G., Balebanov V., Balikhin M., Galeev A., Gribov B., Nozdrachev M., Smirnov V., Sokolov A., Vaisberg O., Oberc P., Krawczyk Z., Grzedzielski S., Juchniwicz J., Nowak K., Orlovsky D., Parfianovich B., Wozniak D., Zbyszynski Z., Voita Ya., Triska P.* Extremely-low-frequency. Plasma Waves in the Environment of Comet Halley. *Nature*. 1986, V. 321, PP. 292—293
149. *Klimov S., Galeev A., Nozdrachev M., Sagdeev R., Savin S., Shapiro V., Sokolov A., Orlovsky D.* Fine Structure of the Near-cometary Bow Shock From Plasma Wave Measurements (APV—N Experiments). Exploration of Halley's Comet. ESA SP-250. 1986, V. 1, PP. 255—258
150. *Korth A., Richter A. K., Anderson K. A., Carlson C. W., Curtis D. W., Lin R. P., Reme H., Sauvaud J. A., D'Uston C., Cotin F., Cros A., Mendis D. A.* Cometary Ion Observations at and within Cometopause-region of Comet Halley. *Adv. Space Res.* 1985, V. 5 No 12, PP. 221—225
151. *Korth A., Richter A. K., Loidl A., Anderson K. A., Carlson C. W., Curtis D. W., Lin R. P., Reme H., Sauvaud J. A., D'Uston C., Cotin F., Gros A., Mendis D. A.* Mass Spectra of Heavy Ions near Comet Halley. *Nature*. 1986, V. 321, PP. 335—336
152. *Korth A., Richter A. K., Mendis D. A., Anderson K. A., Carlson C. W., Curtis D. W., Lin R. P., Mitchell D. L., Reme H., Sauvaud J. A., D'Uston C.* Radial Variations of Flow Parameters and Composition of Cold Cometary Ions Within 50.000 km of Halley's Nucleus/ Exploration of Halley's Comet. ESA SP-250. 1986, V. 1, PP. 199—201
153. *Korth A., Richter A. K., Mendis D. A., Anderson K. A., Carlson C. W., Curtis D. W., Lin R. P., Mitchell D. L., Reme H., Sauvaud J. A., D'Uston C.* The Composition and Radial Dependence of Cometary Ions in the Coma of Comet P/Halley. *Astron. Astrophys.* 1987, V. 187, PP. 149—152
154. *Korth A., Marconi D. L., Mendis D. A., Krueger F. R., Richter A. K., Lin R. P., Mitchell D. L., Anderson K. A., Carlson C. W., Reme H., Sauvaud J. A., d'Uston C.* Probable Detection of Organic-dust-bort Aromatic CH Ions in the Coma of Comet Halley. *Nature*. 1989. in press.
155. *Krankowsky D., Lammerzahn P., Dorflinger D., Herrwerth I., Stubbe-mann U., Woweries J., Eberhardt P., Dolder U., Fisher J., Herrmann U., Hofstetter H., Jungck M., Meier F. O., Schulte W., Bertheliet J. J., Illiano J. M., Godejroy M., Godly G., Thevent P., Hoffman J. H., Hodges R. R., Wright W. W.* The Giotto Neutral Mass Spectrometer. The Giotto Mission — Its Scientific Investigations, ed by R. Reinhard, B. Bat-trick. ESA SP-1077, 1986, PP. 109—128
156. *Krankowsky D., Lammerzahn P., Herrwerth I., Woweries J., Eberhardt P., Dolder U., Herrmann U., Schulte W., Bertheliet J. J., Illiano J. M., Hodges R. R., Hoffman J. H.* In Situ Gas and Ion Measurements at Comet Halley. *Nature*. 1986, V. 321, PP. 326—329
157. *Krankowsky D., Eberhardt P.* Evidence for the Composition of Ices in the Nucleus of Comet Halley. Comet Halley 1986, World Wide Investiga-

- tions. Results and Interpretations. Ellis Horwood Limited. 1989. Chichester, England.
158. *Krasnopolsky V. A., Gogoshev M., Moreels G., Moroz V. I., Kkysko A., Gogosheva Ts., Palasov K., Sargoichev S., Clairemidi J., Vincent M., Bertaux J. L., Blamont J. E., Troshin V. S., Valnicek B.* Spectroscopic Study of Comet Halley by the Vega-2 Three-Channel Spectrometer. *Nature*. 1986, V. 321, PP. 269—271
  159. *Lammerzahl P., Krankowsky D., Hodges R. R., Stubbeman U., Woweries J., Herrwerth I., Berthelier J. J., Illiano J. M., Eberhardt P., Dolder U., Schulte W., Hoffman J. H.* Expansion Velocity and Temperature of Gas and Ions Measured in the Coma of comet P/Halley. *Exploration of Halley's Comet*. ESA SP-250. 1986, V. 1, PP. 179—182
  160. *Lammerzahl P., Krankowsky D., Hodges R. R., Stubbeman U., Woweries J., Herrwerth I., Berthelier J. J., Illiano J. M., Eberhardt P., Dolder U., Schulte W., Hoffman J. H.* Expansion Velocity and Temperature of Gas and Ions Measured in the Coma of comet P/Halley. *Astron. Astrophys.* 1987, V. 187, PP. 169—173
  161. *McKenna—Lawlor S., Thomson A., O'Sullivan D., Kirsh E., Melrose D., Wenzel K.-P.* The Giotto Energetic Particle Experiment. The Giotto Mission—Its Scientific Investigations, ed by R. Reinhard, B. Battrick. ESA SP-1077, 1986, PP. 53—65
  162. *McKenna—Lawlor S., Kirsh E., O'Sullivan D., Thompson A., Wenzel K. P.* Energetic Ions in the Environment of Comet Halley. *Nature*. 1986, V. 321, PP. 347—349
  163. *McKenna—Lawlor S., Kirsh E., Thompson A., O'Sullivan D., Wenzel K.-P.* The Lightweight Energetic Particle Detector EPONA and its Performance on Giotto. *J. Phys. E: Sci. Instrum.* 1987, V. 20, PP. 732—738
  164. *Mendis D. A., Houppis H. L. F., Markoni M. L.* The Physics of Comets. *Fund. Cosmic Phys.* 1985, V. 10, PP. 1—380
  165. *Mikhailov Y., Molchanov O., Mogilevsky M., Eroshenko E. G., Grard R., Pedersen A., Beghin C., Trotignon J.-C., Formisano V., Schwingsenschuh K.* Correlation Between Magnetic and Electric Field Fluctuations Observed During Flyby Near Halley's Comet. *Symposium on Diversity and Similarity of Comets*. ESA SP-278. 1987, PP. 109—112
  166. *Mitchell D. L., Lin R. P., Anderson K. A., Carlson C. W., Curtis D. W., Korh A., Richter A. K., Reme H., Sauvaud J. A., d'Uston C., Mendis D. A.* Derivation of Heavy (10—210 AMU) Ion Composition and Flow Parameters for the Giotto PICCA Instrument. *Exploration of Halley's Comet*. ESA SP-250, 1986, V. 1, PP. 203—205
  167. *Mitchell D. L., Lin R. P., Anderson K. A., Carlson C. W., Curtis D. W., Korh A., Reme H., Sauvaud J. A., d'Uston C., Mendis D. A.* Evidence for Chain Molecules Enriched in Carbon, Hydrogen, and Oxygen in Comet Halley. *Science*, 1987, V. 237, PP. 626—628
  168. *Mogilevsky M., Mikhailov Y., Molchanov O., Grard R., Pedersen A., Trotignon J. C., Beghin C., Formisano V., Shapiro V., Shevchenko V.* Identification of Boundaries in the Cometary Environment from AC Electric Field Measurements. *Exploration of Halley's Comet*. ESA SP-250, 1986, V. 3, PP. 467—469
  169. *Mogilevsky M., Mikhailov Y., Molchanov O., Grard R., Pedersen A., Trotignon J. G., Beghin C., Formisano V., Shapiro V., Shevchenko V.* Identification of Boundaries in the Cometary Environment from AC Electric Field Measurements. *Astron. Astrophys.* 1987, V. 187, PP. 80—82
  170. *Moreels G., Gogoshev M., Krasnopolsky V. A., Clairemidi J., Vincent M., Parisot J. P., Bertaux J. L., Blamont J. E., Festou M. C., Gogosheva Ts., Sargoichev S., Palasov K., Moroz V. I., Krysko A. A., Vanysek V.* Near-ultraviolet and Visible Spectrometry of Comet Halley from Vega-2. *Nature*. 1986, V. 321, PP. 271—273
  171. *Moroz V. I.* Cometary Atmosphere (Gas and Dust). *Adv. Spase Res.* 1985, V. 5, No 12, PP. 113—121



172. *Moroz V. I., Combes M., Bibring J. P., Coron N., Crovisier J., Encrenaz T., Crifo J. F., Sanko F., Grigoriev A. V., Bockelee-Morvan D., Gispert R., Nicolsky Y. V., Emerich C., Lamarre J. M., Rocard F., Krasnopolsky V. A., Owen T.* Detection of Parent Molecules in Comet P / Halley // *Astron. Astrophys.* 1987, V. 187, PP. 513—518
173. *Mukai T., Miyake W., Terasawa T., Kitayama M., Hirao K.* Plasma Observations by Suisei of Solar-wind Interaction with Comet Halley. *Nature.* 1986, V. 321, PP. 299—303
174. *Mukai T., Kitayama M., Miyake W., Terasawa T., Hirao K.* Plasma Characteristics Around Comet Halley Observed by Suisei Exploration of Halley's Comet. *ESA SP-250.* 1986, V. 1, PP. 71—75.
175. *Mukai T., Miyake W., Terasawa T., Kitayama M., Hirao K.* Spatial Distribution of Water-group Ions Near Comet P/Halley Observed by Suisei. *Astron. Astrophys.* 1987, V. 187, PP. 129—131
176. *Murad E., Boehler P.* Speculations About the Origin of  $H_3O^+$  Seen in Cometary Mass Spectra. *Nature.* 1987, V. 326, NO 6111, PP. 366—367
177. *Neubauer F. M., Glassmeier K. H., Pohl M., Raeder J., Acuna M. H., Burlaga L. F., Ness N. F., Musmann G., Mariani F., Wallis M. K., Ungstrup E., Schmidt H. U.* First Results from Giotto Magnetometer Experiment at Comet Halley. *Nature.* 1986, V. 321, PP. 352—355
178. *Neubauer F. M., Acuna M. H., Burlaga L. F., Franke B., Gramkow B., Mariani F., Musmann G., Ness N. F., Schmidt H. U., Terenzi T., Ungstrup E., Wallis M.* The Giotto Magnetic Field Investigation. The Giotto Mission—Its Scientific Investigations, ed. by R. Reinhard, B. Baltrick. *ESA SP-1077,* 1986. PP. 1—14
179. *Neubauer F. M.* Giotto Magnetic Field Results on the Magnetic Field Pile-up Region and the Cavity Boundaries. *Exploration of Halley's Comet.* *ESA SP-250.* 1986, V. 1, PP. 35—41.
180. *Neubauer F. M.* Giotto Magnetic—Field Results on the Boundaries of the Pile-up Region and the Magnetic Cavity. *Astron. Astrophys.* 1987, V. 187, PP. 73—79.
181. *Neubauer F. M.* The Ionopause Transition and Boundary Layer at Comet Halley from Giotto Magnetic Field Observations *J. Geophys. Res.* 1988, V. 93, PP. 7272—7281
182. *Neugebauer M., Clay D. E., Goldstein B. E., Goldstein R.* Energetic Ion Mass Spectrometer. *Rev. Sci. Instr.* 1982, V. 53, PP. 277—282
183. *Neugebauer M., Lazarus A. J., Altwegg K., Balsiger H., Goldstein B. E., Goldstein R., Neubauer F. M., Rosenbauer H., Schwenn R., Shelly E. G., Ungstrup E.* The Pick-up of Cometary Protons by the Solar Wind. *Exploration of Halley's Comet.* *ESA SP-250.* 1986, V. 1, PP. 19—23
184. *Neugebauer M., Lazarus A. J., Altwegg K., Balsiger H., Goldstein B. E., Goldstein R., Neubauer F. M., Rosenbauer H., Schwenn R., Shelly E. G., Ungstrup E.* The pick-up of cometary protons by the solar wind. *Astron. Astrophys.* 1987, V. 187, PP. 21—24
185. *Neugebauer M., Neubauer F. M., Balsiger H., Fuselier S. A., Goldstein B. E., Goldstein R., Mariani F., Rosenbauer H., Schwenn R., Shelly E. G.* The Variation of Protons, Alpha Particles, and the Magnetic Field Across the Bow Shock of Comet Halley. *Geophys. Res. Lett.* 1987, V. 14, PP. 995—998
186. *Niedner M. B., Jr., Schwingenschuh K.* Plasma-tail Activity at the Time of the Vega Encounters. *Exploration of Halley's Comet.* *ESA SP-250.* 1986, V. 3, PP. 419—424
187. *Niedner M. B., Jr., Schwingenschuh K.* Plasma-tail Activity at the Time of the Vega Encounters. *Astron. Astrophys.* 1987, V. 187, PP. 103—108
188. *Oberc P., Orlowsky D., Wronowsky R., Klimov S., Savin S.* Plasma Waves in the Halley's Inner Coma as Measured by the APV—N Experiment During Vega Mission. *Exploration of Halley's Comet.* *ESA SP-250.* 1986, V. 1, PP. 89—92
189. *Oberc P., Parzydło W., Koperski P., Orlowsky D., Klimov S.* Some New

Features of Plasma Wave Phenomena at Halley: APV—N Observations. Symposium on Diversity and Similarity of Comets. ESA SP-278, 1987, PP. 89—95

190. *Olivero J. J., Stagat R. W., Green A. E. S.* Electron Deposition in Water Vapor with Atmospheric Application. *J. Geophys. Res.* 1972, V. 77, PP. 4797—4811
191. *Oyama K. I., Hirao K.* Solar Wind Plasma Flow and Motion of Comet Tail. *Adv. Spase Res.* 1985, V. 5, NO 12, PP. 65—72
192. *Oya H., Morioka A., Miyake W., Smith E. J., Tsurutani B. T.* Discovery of Cometary Kilometric Radiation and Plasma Waves at Comet Halley. *Nature.* 1986, V. 321, PP. 307—310
193. *Pedersen A., Grard R., Trotignon J. G., Beghin C., Mikhailov Y., Mogilevsky M.* Measurements of Low Energy Electrons and Spacecraft Potentials Near Comet Halley Exploration of Halley's Comet. *ESA SP-250.* 1986. V. 3, PP. 425—431
194. *Pedersen A., Grard R., Trotignon J. G., Beghin C., Mikhailov Y., Mogilevsky M.* Measurements of Low Energy Electrons and Spacecraft Potentials Near Comet P/Halley. *Astron. Astrophys.* 1987, V. 187, PP. 297—303
195. *Raeder J., Neubauer F. M., Ness N. F., Burlaga L. F.* Macroscopic Perturbations of the IMF by P/Halley as Seen by the Giotto Magnetometer. Exploration of Halley's Comet. *ESA SP-250.* 1986, V. 1, PP. 173—178
196. *Raeder J., Neubauer F. M., Ness N. F., Burlaga L. F.* Macroscopic Perturbations of the IMF by P/Halley as Seen by the Giotto Magnetometer. *Astron. Astrophys.* 1987, V. 187, PP. 61—64
197. *Reinhard R.* The Giotto Encounter with Comet Halley *Nature.* 1986, V. 321, PP. 313—318
198. *Reinhard R.* The Giotto Mission to Halley's Comet. Exploration of Halley's Comet / ed. by M. Grewing, F. Praderie, R. Reinhard. 1987. Springer—Verlag. Berlin—Heidelberg—New York. PP. 949—958
199. *Reme H., Sauvaud J. A., d'Uston C., Cotin F., Cros A., Anderson K. A., Carlson C. W., Curtis D. W., Lin R. P., Mendis D. A., Korth A., Richter A. K.* Comet Halley—Solar Wind Interaction From Electron Measurements Aboard Giotto. *Nature.* 1986, V. 321, PP. 349—352
200. *Reme H., Sauvaud J. A., d'Uston C., Cros A., Anderson K. A., Carlson C. W., Curtis D. W., Lin R. P., Korth A., Richter A. K., Mendis D. A.* General Features of the Comet Halley—Solar Wind Interaction from Plasma Measurements // Exploration of Halley's Comet. *ESA SP-250,* 1986, V. 1, PP. 29—34
201. *Reme H., Comet F., Cros A., Medale J. L., Korth A., Richter A. K., Loidl A., Anderson K. A., Carlson C. W., Curtis D. W., Lin R. P., Mendis D. A.* The Giotto RPA—Copernic Plasma Experiment. The Giotto Mission—Its Scientific Investigations / ed. by R. Reinhard, B. Battrock. *ESA SP-1077,* 1986, PP. 33—52
202. *Reme H., Sauvaud J. A., d'Uston C., Cros A., Anderson K. A., Carlson C. W., Curtis D. W., Lin R. P., Korth A., Richter A. K., Mendis D. A.* General Features of Comet P/Halley: Solar Wind Interaction from Plasma Measurements. *Astron. Astrophys.* 1987, V. 187, PP. 33—38
203. *Remizov A. P., Verigin M. I., Gringauz K. I., Apathy I., Szemerey I., Gombosi T. I., Richter A. K.* Measurements of neutral particle density in the vicinity of comet Halley by PLAZMAG-1 on board VEGA-1,2. *ESA SP-250,* 1986, V. 1, P. 387—390
204. *Richter A. K., Daly P. W., Verigin M. I., Gringauz K. I., Erdos G., Kechemety K., Somogyi A. J., Szego K., Varga A., McKenna—Lawlor S.* Quasi—Periodic Variations of Cometary Ion Fluxes at Large Distances from Comet Halley. *Annales Geophysicae.* 1989.
205. *Riedler W., Schwingenschuh K., Schmidt R. Y., Eroshenko E. G., Stjazzhin V. A.* The magnetic Field Experiment for the Venus—Halley (VEGA)

- Mission. Cometary Exploration III. Budapest: Central Res. Inst. Phys. Press. 1983, PP. 411—419
206. Riedler W., Schwingenschuh K., Yeroshenko Ye., Russell C. T. The VEGA Magnetic Field Experiment. Field, Particle and Wave Experiments on Cometary Missions. Graz: Austria Academy of Sciences Publication. 1986, PP. 155—168.
  207. Riedler W., Schwingenschuh K., Eroshenko Ye. G., Styaskin V. A., Russell C. T. Magnetic Field Observations in Comet Halley's Coma. Nature. 1986, V. 321, PP. 288—289
  208. Rosenvinge T. T., Brandt J. C., Farquar R. W. The International Cometary Exploration Mission to Comet Giacobini—Zinner. Science. 1986, V. 232, NO 4, PP. 353—356
  209. Russell C. T., Riedler W., Schwingenschuh K., Yeroshenko Ye. Mirror Instability in the Magnetosphere of Comet Halley. Geophys. Res. Lett. 1987, V. 14, PP. 644—647
  210. Russell C. T. The Interaction of the Solar Wind With Comet Halley: Upwind and Downwind. Quart. J. Royal Astr. Soc. 1988, V. 29, PP. 157—173
  211. Sagdeev R. Z., Shapiro V. D., Shevchenko V. I., Szego K. MHD Turbulence in the Solar Wind—Comet Interaction Region. Geophys. Res. Lett. 1986, V. 13, PP. 85—88
  212. Sagdeev R. Z., Blamont J., Galeev A. A., Moroz V. I., Shapiro V. D., Shevchenko V. I., Szego K. Vega Spacecraft Encounters with Comet Halley Nature, 1986, V. 321, PP. 259—262
  213. Sagdeev R. Z., Szabo F., Avanesov G. A., Gruvellier P., Szabo L., Szego K., Abergel A., Balazs A., Barinov I. V., Bertaux J.-L., Blamont J., Dettaille M., Demarelis E., Dul'nev G. N., Endroczy G., Gardos M., Kan'nyo M., Kostenko V. I., Krasikov V. A., Nguen—Trong T., Nyitrai Z., Remy I., Ruzsnyak P., Shamis V. A., Smith B., Sukhanov K. G., Szalai S., Tarnopolsky V. I., Toth I., Tlukhanova G., Valnicek B. I., Varhalmi L., Zaiko Yu. K., Zatsepin S. I., Ziman Ya L., Zsenei M., Zhukov B. S. Television Observations of Comet Halley from VEGA Spacecraft. Nature. 1986, V. 321, PP. 262—265
  214. Sagdeev R. Z. The Vega Mission to Halley's Comet. Exploration of Halley's Comet, ed. by M. Grewing, F. Praderie, R. Reinhard, 1987. Springer—Verlag. Berlin—Heidelberg—New York. PP. 959—964.
  215. Saito T., Yumoto K., Hirao K., Nakagawa T., Saito K. Interaction Between Comet Halley and the Interplanetary Magnetic Field Observed by Sakigake. Nature. 1986, V. 321, PP. 303—307
  216. Sanderson T. R., Wenzel K. P., Daly P. W., Cowley S. W. H., Hynds R. J., Richardson I. G., Smith E. J., Bame S. J., Zwickl R. D. Observations of Heavy Energetic Ions far Upstream from Comet P/Halley. Astron. Astrophys. 1987, V. 187, PP. 125—128
  217. Sauer K., Baumgartel K. Magnetic Cavity Formation at Comet Halley and the AMPTE Li Release. Symposium on Diversity and Similarity of Comets. ESA SP-278. 1987, PP. 113—118
  218. Sauer K. A New Plasma Model for Comet Halley. Preprint No. 1/88 Institut für Kosmosforschung Akademie der Wissenschaften der DDR. 1988, Berlin, PP. 1—23
  219. Sauer K., Motschmann U. Plasma boundaries at comet Halley. Preprint No. 2/89 Institut für Kosmosforschung Akademie der Wissenschaften der DDR. 1989. Berlin, PP. 1—23
  220. Savin S., Avanesov G., Balikhin M., Klimov S., Sokolov A., Oberc P., Orlowski D., Krawczyk Z. ELF Waves in the Plasma Regions near the Comet. Exploration of Halley's Comet. ESA SP-250. 1986, V. 3, PP. 433—436
  221. Savin S., Avanesova G., Balikhin M., Wozniak D., Wronowski P., Klimov S., Krawczyk Z., Nozdrachev M., Orlowski D., Sokolov A., Juchnie-wicz J. Comparative Study of the Low—Frequency Waves Near Comet

- P/Halley During the Vega-1 and Vega-2 Flybys. *Astron. Astrophys.* 1987, V. 187, PP. 89—93
222. Scarf F. L., Coroniti F. W., Kennel C. F., Gurnett D. A., Ip W.-H., Smith E. J. Observations of Cometary Plasma Wave Phenomena, Exploration of Halley's Comet ESA SP-250, 1986, V. 1, PP. 163—168
  223. Scarf F. L., Coroniti F. W., Kennel C. F., Gurnett D. A., Ip W.-H., Smith E. J. Observation of Cometary Plasma-wave Phenomena. *Astron. Astrophys.* 1987, V. 187, PP. 109—116
  224. Schmidt H. U., Wegman R. Plasma Flow and Magnetic Fields in the Comets. *Comets*. Tucson. Univ. of Arizona Press. 1982, pp. 538—634
  225. Schmidt H. U., Wegmann R., Neubauer F. M. MHD-model for Comet Halley. Exploration of Halley's Comet. ESA SP-250, 1986, V. 1, PP. 43—46
  226. Schmidt H. U., Wegmann R., Huebner W. F., Boice D. C. Cometary Gas and Plasma Flow with Detailed Chemistry / Computer Phys. Commun. 1988. V. 49, PP. 17—59
  227. Schmidt R., Arens A. Measurements of Integral Yields of Charged Secondary Particles Using Neutral Beams Simulating a Cometary Fly-by. The Giotto Spacecraft Impact—Induced Plasma Environment. ESA SP-224. 1984, PP. 15—19
  228. Schwenn R., Ip W.-H., Rosenbauer H., Balsiger H., Buhler F., Goldstein R., Meier A., Shelley E. G. Ion Temperature and Flow Profiles in Comet Halley's Close Environment. Exploration of Halley's Comet. ESA SP-250. 1986, V. 1, PP. 225—227
  229. Schwenn R., Ip W.-H., Rosenbauer H., Balsiger H., Buhler F., Goldstein R., Meier A., Shelley E. G. Ion Temperature and Flow Profiles in Comet P/Halley's Close Environment *Astron. Astrophys.* 1987, V. 187, PP. 160—162
  230. Schwingenschuh K., Riedler W., Schelh G., Eroshenko Ye. G., Styaskin V. A., Luhman J. G., Russell C. T., Fedder J. A. Cometary Boundaries: Vega Observations at Halley. *Adv. Space Res.* 1986, V. 6, NO 1, PP. 217—268
  231. Schwingenschuh K., Riedler W., Lichtenegger H. I. M., Phillips J. L., Luhman J. G., Russell C. T., Fedder J. A., Somogyi A. J., Eroshenko Ye. G. Variability of Comet Halley's Coma: Vega-1 and Vega-2 Magnetic Field Observations. Symposium on Diversity and Similarity of Comets. ESA SP-278, 1987, PP. 63—67
  232. Schwingenschuh K., Riedler W., Eroshenko Ye. G., Phillips J. L., Russell C. T., Luhman J. G., Fedder J. A. Magnetic Field Drapping in the Comet Halley Coma: Comparison of Vega Observations with Computer Simulations *Geophys. Res. Lett.* 1987, V. 14, PP. 640—643
  233. Shelley E. G., Fuselier S. A., Drake J. F., Ip W.-H., Balsiger H., Goldstein B. E., Goldstein R., Neugebauer M. Charge Exchange of Solar Wind Ions in the Comet Halley's Coma. Exploration of Halley's Comet. ESA SP-250. 1986, V. 1, PP. 285—289
  234. Shelley E. G., Fuselier S. A., Balsiger H., Drake J. F., Geiss J., Goldstein B. E., Goldstein R., Ip W.-H., Lazarus A. J., Neugebauer M. Charge Exchange of Solar Wind Ions in the Coma of Comet P/Halley. *Astron. Astrophys.* 1987, V. 187, PP. 304—306
  235. Smith E. J., Tsurutani B. T., Slavin J. A., Jones D. E., Siscoe G. L., Mendis D. A. International Cometary Explorer Encounter with Giacobini—Zinner: Magnetic Field Observations. *Science.* 1986, V. 232, PP. 382—385
  236. Somogyi A., Szabó L., Afonin V. V., Banfalvi A., Ere J., Farago M., Gombosi T., Gringauz K. I., Kecskemety K., Keppler E., Klimenko I. N., Kovacs T., Kosma G., Logachev Yu. I., Lohonyai L., Marsden R., Redl R., Remizov A. P., Richter A., Skuridin G. A., Stolpovskii V. G., Szepesvari A., Szucs I.-T., Varga A., Vladimirova G. A., Wenzel K. P., Windberg J. Tunde-M Apparatus of the SPF Unit of the Vega Program //

237. *Somogyi A. J., Afonin V. V., Erdos G., Ero J., Gombosi T., Gringauz K. I., Kecskemety K., Keppler E., Klimenko I. N., Kovacs T., Kosma D., Logachev Yu. I., Lohonyai L., Marsden R., Remizov A. P., Richter A., Scuridin G. A., Stolpovskii V. G., Szabo L., Szego K., Szentpetery I., Szucs I.-T., Szepesvary A., Tatrallyay M., Varga A., Verigin M. I., Wenzel K. P., Windberg J., Vladimirova G. A.* First Results of High Energy Particle Measurements with the TUNDE-M Telescopes on Board of the S/C Vega-1 and 2 // Field Particle and Wave Experiments on the Cometary Missions. Graz: Austria Academy of Sciences Publication. 1986. PP. 237—247
238. *Somogyi A. J., Gringauz K. I., Szego K., Szabo L., Kosma D., Remizov A. P., Ero J., Klimenko I. N., Szucs I.-T., Verigin M. I., Windberg J., Cravens T. E., Dyachkov A., Erdos G., Farago M., Gombosi T. J., Kecskemety K., Keppler E., Kovacs T., Logachev Yu. I., Lohonyai L., Marsden R., Redi R., Richter A. K., Stolpovskii V. G., Szabó L., Szentpetery I., Szepesvary A., Tatrallyay M., Varga A., Vladimirova G. A.* First Observations of Energetic Particles near Comet Halley. *Nature*. 1986, V. 321, PP. 285—287
239. *Takahashi S., Terasawa T., Mukai T., Kitayama M., Miyake W., Hirao K.* Plasma Flow in the Cometsheath of P/Halley during the Encounter of Suisel. *Astron. Astrophys.* 1987, V. 187, PP. 94—96
240. *Terasawa T., Takahashi S., Mukai T., Kitayama M., Miyake W., Hirao K.* Ion-pickup/Mass-loading Process Around Halley Observed by Suisel. *Exploration of Halley's Comet. ESA SP-250* 1986, V. 1, PP. 281—283
241. *Terasawa T., Mukai T., Miyake W., Kitayama M., Hirao K.* Detection of Cometary Pickup Ions up to 10 from Comet Halley: Suisel Observation *Geophys. Res. Lett.* 1986, V. 13, PP. 837—840
242. *Thomson M. F., Feldman W. C., Wilken B., Jockers K., Studeman W., Johnstone A. D., Coates A., Formisano V., Amata E., Winningham J. D., Borg H., Bryant D., Wallis M. K.* In-situ Observation of a Bi-modal Ion Distribution in the Outer Coma of Comet P/Halley. *Astron. Astrophys.* 1987, V. 187, PP. 141—148
243. *Tsurutani B. T., Smith E. J.* Strong Hydromagnetic Turbulence Associated with Comet Giacobini—Zinner. *Geophys. Res. Lett.* 1986, V. 13, PP. 259—262
244. *Tsurutani B. T., Smith E. J.* Hydromagnetic Waves and Instabilities associated with Cometary Ion Pickup: ICE Observations. *Geophys. Res. Lett.* 1986, V. 13, PP. 263—266
245. *Tsurutani B. T., Brinca A. L., Smith E. J., Thorne R. M., Scarf F. L., Gosling G. T., Ipavich F. M.* MHD Waves Detected by ICE at Distances >28·10 km from Comet Halley: Cometary or Solar Wind Origin? *Exploration of Halley's Comet. ESA SP-250*. 1986, V. 3, PP. 451—456
246. *Tsurutani B. T., Brinca A. L., Smith E. J., Thorne R. M., Scarf F. L., Gosling G. T., Ipavich F. M.* MHD Waves Detected by ICE at Distances 28·10 km from Comet P/Halley: Cometary or Solar Wind Origin? *Astron. Astrophys.* 1987, V. 187, PP. 97—102
247. *Vaisberg O. L., Zastenker G., Smirnov V., Khazanov B., Omelchenko A., Fedorov A., Zakharov D.* Spatial Distribution of Heavy Ions in Comet P/Halley's Coma. *Astron. Astrophys.* 1987, V. 187, PP. 183—190
248. *Vegmann R., Schmidt H. U., Huebner W. F., Boice D. C.* Cometary MHD and Chemistry. *Astron. Astrophys.* 1987, V. 187, PP. 339—350
249. *Verigin M. I., Gringauz K. N., Richter A. K., Gombosi T. I., Remizov A. P., Szego K., Apathy I., Szemerey I., Tatrallyay M., Lezhen L. A.* Characteristic Features of the Cometsheath of Comet Halley: Vega-1 and Vega-2 observations. *Exploration of Halley's Comet. ESA SP-250*, 1986, V. 1, PP. 169—173
250. *Verigin M. I., Axford W. I., Gringauz K. I., Richter A. K.* Acceleration of Cometary Plasma in the Vicinity of Comet Halley Associated with

- an Interplanetary Magnetic Field Polarity Change. *Geophys. Res. Lett.* 1987, V. 14, PP. 987—990
251. Verigin M. I., Gringauz K. I., Richter A. K., Gombosi T. I., Remizov A. P., Szego K., Apathy I., Szemerey T., Tatrallyay M., Lezhen L. A. Plasma Properties from the Upstream Region to the Cometopause of Comet Halley: Vega observations. *Astron. Astrophys.* 1987, V. 187, PP. 121—124
  252. Wallis M. K. Shock Free Deceleration of the Solar Wind? *Nature (Physical Science)* 1971, V. 233, PP. 23—25
  253. Wallis M. K., Ong R. S. B. Strongly Cooled Ionizing Plasma Flows with Application to Venus. *Planet Space Sci.* 1975, V. 23, PP. 713—721
  254. Wegmann R., Schmidt H. U., Huebner W. F., Boice D. C. Cometary and Chemistry: Application to Halley. *Symposium on Diversity and Similarity of Comets.* ESA SP-278, 1987, PP. 277—282
  255. Wilken B., Jockers K., Johnstone A., Coates A., Heath J., Formisano V., Amata E., Winningham J. D., Thomsen M., Bryant D. A., Borg H. Comet Plasma Tail Formation—GIOTTO Observations. *Adv. Space Res.* 1986, V. 6, NO 1, PP. 337—344
  256. Wilken B., Jockers K., Studeman W., Rosenbauer H., Thomsen M. F., Johnstone A., Coates A., Formisano V., Amata E., Winningham J. D., Bor G. H. Energetic Cometary Water Group Ions at Halley's Bow Shock: Observations with the Giotto Ion Spectrometer IIS. *Exploration of Halley's Comet.* ESA SP-250, 1986, V. 1, PP. 305—308
  257. Wilken B., Johnstone A., Coates A., Borg H., Amata E., Formisano V., Jockers K., Rosenbauer H., Studemann W., Thomson M. F., Winningham J. D. Pick-up Ions at Comet P/Halley's Bow Shock: Observations with the IIS Spectrometer on Giotto. *Astron. Astrophys.* 1987, V. 187, PP. 153—159
  258. Winske D., Wu C. S., Li Y.-Y., Mou Z. Z., Guo S. Y. Coupling of New-born Ions to the Solar Wind by the Electromagnetic Instabilities and their Interaction with the Bow Shock // *J. Geophys. Res.* 1985, V. 90, PP. 2713—2719
  259. Woods T. N., Feldman P. D., Dymond K. F., Sahnou D. J. Rocket Ultraviolet Spectroscopy of Comet Halley and Abundance of Carbon Monoxide and Carbon. *Nature.* 1986, V. 324, PP. 436—438
  260. Woods T. N., Feldman P. D., Dymond K. F. The Atomic Carbon Distribution in the Coma of Comet Halley. *Exploration of Halley's Comet.* ESA SP-250, 1986, V. 1, PP. 431—435
  261. Woods T. N., Fedman P. D., Dymond K. F. The Atomic Carbon Distribution in the Coma of Comet P/Halley. *Astron. Astrophys.* 1987, V. 187, PP. 380—384
  262. Wu Z.-J. Calculation of the Shape of the Contact Surface at Comet Halley. *Symposium on Diversity and Similarity of Comets.* ESA SP-278, 1987, PP. 69—73
  263. Yeroshenko Y. G., Styashkin V. A., Riedler W., Schwingenschuh K., Russell C. T. Magnetic Field Fine Structure in Comet Halley's Coma. *Exploration of Halley's Comet.* ESA SP-250, 1986, V. 1, PP. 178—192
  264. Yeroshenko Y. G., Styashkin V. A., Riedler W., Schwingenschuh K., Russell C. T. Fine Structure of the Magnetic Field in Comet P/Halley's Coma. *Astron. Astrophys.* 1987, V. 187, PP. 69—72
  265. Yumoto K., Saito T., Nakagawa T. Hydromagnetic Waves Associated with Cometary Water Group Ions: Sakigake Observation. *Astron. Astrophys.* 1987, V. 187, PP. 117—120
  266. Zastenker G., Vaisberg O., Smirnov V., Fedorov A., Omelchenko A. Distribution of Cometary Ions and Flow Properties in Halley Comet. *Exploration of Halley's Comet.* ESA SP-250, 1986, V. 1, PP. 183—188